



Tesis - TM142501

**PENGEMBANGAN SISTEM KONTROL
MODULAR UNTUK MOTOR LISTRIK BLDC
AKSIAL DENGAN MENGGUNAKAN
ALGORITMA FUZZY LOGIC, UNTUK
MENINGKATKAN PERFORMA MOTOR LISTRIK**

**GRANGSANG SOTYARAMADHANI
NRP 2115205003**

**DOSEN PEMBIMBING
Alief Wikarta, ST., M.Sc.Eng., Ph.D.
Dr. Muhammad Nur Yuniarto**

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN DESAIN SISTEM MEKANIKAL
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017**

Halaman ini sengaja dikosongkan



Tesis - TM142501

**DEVELOPMENT OF MODULAR CONTROLLER
SYSTEM FOR AXIAL BLDC ELECTRIC MOTOR
BY USING FUZZY LOGIC ALGORITHM, TO
INCREASE PERFORMANCE OF ELECTRIC
MOTOR**

**GRANGSANG SOTYARAMADHANI
NRP 2115205003**

**SUPERVISOR
Alief Wikarta, ST., M.Sc.Eng., Ph.D.
Dr. Muhammad Nur Yuniarto**

**MASTER PROGRAM
MECHANICAL SYSTEM DESIGN ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017**

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T.)
Di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :
Grangsang Sotyaramadhani, ST.
NRP. 2115205003

Tanggal Ujian : Senin, 24 Juli 2017
Periode Wisuda : Semester Genap 2016/2017

Disetujui oleh :

1. **Alief Wikarta, ST. M.Sc.Eng., Ph.D.**
NIP. 198202102006041004
(Dosen Pembimbing I)
2. **Dr. Muhammad Nur Yuniarto**
NIP. 197506301998021001
(Dosen Pembimbing II)
3. **Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc.,
Ph.D.**
NIP. 195106051978081002
(Dosen Penguji)
4. **Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.**
NIP. 196508101991021001
(Dosen Penguji)
5. **Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST.,
M.Eng.Sc.**
NIP. 197805102001121001
(Dosen Penguji)

(.....)

(.....)

(.....)

(.....)

(.....)



Dekan Fakultas Teknologi Industri

Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.
NIP. 196905071995121001

Halaman ini sengaja dikosongkan



PENGEMBANGAN SISTEM KONTROL MODULAR UNTUK MOTOR LISTRIK BLDC AKSIAL DENGAN MENGGUNAKAN ALGORITMA FUZZY LOGIC, UNTUK MENINGKATKAN PERFORMA DAN EFISIENSI MOTOR LISTRIK

Mahasiswa Nama : Grangsang Sotyaramadhani
Mahasiswa ID : 2115205003
Pembimbing : Alief Wikarta, ST., M.Sc. Eng., Ph.D.
Co- Pembimbing : Dr. Muhammad Nur Yuniarto

ABSTRAK

Teknologi otomotif saat ini telah berkembang dengan sangat pesat, kendaraan listrik adalah salah satu primadona pada pengembangan teknologi otomotif. Efisiensi yang lebih tinggi, performa yang lebih baik, dan ramah lingkungan adalah nilai tambah yang ditawarkan oleh teknologi ini. Institut Teknologi Sepuluh Nopember turut melakukan penelitian dan pengembangan di bidang ini. Sepeda motor listrik yang dinamai GESITS merupakan produk hasil penelitian dan pengembangan yang dilakukan di ITS. Di akhir tahun 2016 GESITS telah melalui berbagai pengujian. GESITS diuji dengan menggunakan *dynamometer* dan uji jalan untuk mengetahui performa dan efisiensinya. Hasil pengujian GESITS menunjukkan kecepatan maksimum yang dapat dicapai adalah 115 km/jam (di atas *dynamometer*) dan 95 km/jam (pada saat uji jalan).

Hasil pengujian tersebut dirasa masih kurang oleh para peneliti di ITS. Hal tersebut dikarenakan terdapat kendala pada saat melakukan pengaturan parameter operasi dari sistem kontrol modular di GESITS dikarenakan terlalu banyak parameter yang harus diatur dan terdapat beberapa batasan di *software* tersebut. Oleh sebab itu pada tesis ini diusulkan pengembangan dari sistem kontrol modular dengan melakukan implementasi *Fuzzy Logic*.

Hasil implementasi *Fuzzy Logic*, proses pengaturan sistem kontrol modular menjadi lebih mudah. Proses pengaturan cukup dilakukan dengan membuat *membership functions* dan selanjutnya menentukan Fuzzy Rules. Selain itu output yang dihasilkanpun sesuai dengan output yang telah ditentukan dari Fuzzy Response Surface. Dari 3 sample hasil pengujian diketahui bahwa error sistem kontrol dengan fuzzy logic adalah 0%, 0.3%, dan 3%. Sedangkan untuk sistem kontrol tanpa fuzzy logic adalah 14.161%, 72%, dan 15.392%.

Kata kunci: sepeda motor listrik, gesits, sistem kontrol modular, *fuzzy logic*, motor listrik bldc aksial



Halaman ini sengaja dikosongkan



DEVELOPMENT OF MODULAR CONTROL SYSTEM FOR AXIAL BLDC ELECTRIC MOTOR BY USING FUZZY LOGIC ALGORITHM, TO INCREASE PERFORMANCE AND EFFICIENCY OF ELECTRIC MOTOR

Student Name : Grangsang Sotyaramadhani
Student Identity Number : 2115205003
Supervisor : Alief Wikarta, ST., M.Sc. Eng., Ph.D.
Co-Supervisor : Dr. Muhammad Nur Yuniarto

ABSTRACT

Automotive technologies growing very fast nowadays, electric vehicle is one of the most interesting field here. Higher efficiency, better performance, and eco-friendly are values offered by this technology. Insitut Teknologi Sepuluh Nopember does this field of research and invention. Electric motorcycle named GESITS is a product resulted from the research and development done by ITS. In the end of 2016, GESITS was tested in several ways. It was tested using dynamometer and road test to see its performance and efficiency. Based on the test results, GESITS has maximum speed up to 115 km/hour (dynamometer test) and 95km/hour (road test).

Researcher think that these performances are not maximum yet. It is caused by the difficulties of parameters setting on modular control system's software. There are a lot of parameter fields should be filled with a lot of restriction. Considering the problem, this thesis propose to modify the modular control system by applying Fuzzy Logic to its software.

By applying Fuzzy Logic the proses of parameters setting will be easier. Setting process is done by creating membership functions and determining the Fuzzy Rules. Not only convenience in parameters setting but correct output will be resulted also by using Fuzzy Logic based on Table converted from Fuzzy Response Surface. Based on 3 experiment samples, occurred error in control system with fuzzy logic are 0%, 0.3%, and 3%. In the other hand for control system without fuzzy logic are 14.161%, 72%, and 15,392%.

Key words: electric motorcycle, gesits, modular control system, fuzzy logic, axial bldc motor



Halaman ini sengaja dikosongkan



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, atas segala karunia dan ridho-NYA tesis dengan judul “Pengembangan Sistem Kontrol Modular untuk Motor Listrik BLDC Aksial dengan Menggunakan Algoritma Fuzzy Logic, untuk Meningkatkan Performa Motor Listrik” ini dapat diselesaikan.

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) dalam bidang keahlian Desain Sistem Mekanikal pada Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa hormat dan menghaturkan terima kasih yang sebesar – besarnya, kepada:

1. Bapak Alief Wikarta, ST., M.Sc.Eng., Ph.D dan Bapak Dr. Muhammad Nur Yuniarto, selaku dosen pembimbing yang setiap saat selalu menyediakan waktu untuk membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan tesis ini sebaik – baiknya.
2. Bapak Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D., Bapak Dr. Agus Sigit Pramono, DEA., dan Bapak Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST., M.Eng.Sc. selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan masukan dan saran pada saat seminar proposal dan seminar hasil tesis.
3. Kedua orang tua penulis yang selalu memberikan do’a dan semangat dan dukungan selama ini.
4. Seluruh anggota PUI PT SKO (Pusat Unggulan IPTEK Sistem dan Kontrol Otomotif) ITS yang telah memberikan dukungan selama ini.

Tesis ini masih jauh dari sebuah kesempurnaan, oleh sebab itu penulis berharap kritik dan saran yang bersifat membangun demi penulisan di masa mendatang.

Penulis juga berharap tesis ini dapat bermanfaat untuk aplikasi teknologi di kehidupan nyata. Terima kasih.

Surabaya, 07 Agustus 2017

Penulis



Halaman ini sengaja dikosongkan



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
BAB 2 DASAR TEORI DAN STUDI LITERATUR.....	5
5.1. Traksi Sepeda Motor Listrik GESITS	5
5.2. Sistem Kontrol Modular untuk Motor Listrik BLDC Aksial	8
5.3. Motor Listrik BLDC Aksial	14
5.4. Fuzzy Logic	17
1. Metode Mamdani.....	19
5.5. Penelitian Terdahulu.....	19
1. Brushless DC Motor Speed Control System Based on Fuzzy PID Controller.....	20
2. Design of Fuzzy PID Controller Brushless DC Motor.....	20
3. Fuzzy Logic Based Reconfigurable Optimal Switching Controller for BLDC Motor for Reduced Harmonics.....	22
5.6. Usulan Konsep Pengembangan	23
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1. Teknik Pelaksanaan Penelitian	27
3.1.1. Spesifikasi, Algoritma, dan Hasil Pengujian (Data Input)	28
3.1.2. Identifikasi Spesifikasi dan Algoritma.....	28



3.1.3.	Identifikasi Data Hasil Pengujian	28
3.1.4.	Pre-Modifikasi (Implementasi Algoritma <i>Lookup Table</i> pada <i>Firmware</i>).....	28
3.1.5.	Modifikasi Utama (Implementasi Algoritma <i>Fuzzy Logic</i> pada <i>Software</i>)	29
3.1.6.	Integrasi Algoritma <i>Lookup Table</i> dan <i>Fuzzy Logic</i>	30
BAB 4 ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		31
4.1.	Hasil Identifikasi Spesifikasi dan Algoritma	31
4.1.1.	Spesifikasi Sistem Kontrol Modular.....	32
4.1.2.	Algoritma Sistem Kontrol Modular.....	32
4.2.	Hasil Identifikasi Data Hasil Pengujian	34
4.3.	Pre-Modifikasi (Implementasi Algoritma <i>Lookup Table</i> pada <i>Firmware</i>) 34	
4.4.	Modifikasi Utama (Implementasi Algoritma <i>Fuzzy Logic</i> pada <i>Software</i>) 36	
4.5.	Integrasi Algoritma <i>Lookup Table</i> dan <i>Fuzzy Logic</i>	41
4.6.	Hasil Pengujian Algoritma <i>Fuzzy Logic</i> dan <i>Lookup Table</i>	42
4.6.1.	Hasil Pengujian Sistem Kontrol dengan <i>Fuzzy Logic</i>	43
4.6.2.	Hasil Pengujian Sistem Kontrol tanpa <i>Fuzzy Logic</i>	46
4.6.3.	Pembahasan Hasil Pengujian.....	49
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARANN		51
5.1.	Kesimpulan	51
5.2.	Saran	52
5.3.	Penelitian Selanjutnya.....	52
DAFTAR PUSTAKA.....		xix
BIOGRAFI PENULIS		xxi



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Gaya hambat pada Sepeda Motor Listrik GESITS	5
Gambar 2. Grafik hubungan Torsi, RPM, Kecepatan dan Daya GESITS berdasarkan perhitungan	7
Gambar 3. Blok Diagram Simulink dari Sepeda Motor Listrik GESITS	8
Gambar 4. Konsep Sistem Kontrol Modular untuk Motor Listrik BLDC Aksial (Sumber : Agus Mukhlisin; 2014).....	9
Gambar 5. Prototype Sistem Kontrol Modular untuk Motor Listrik BLDC Aksial (a) Modul Controller, (b) Modul Driver, (c) Assembly Modul Controller dan Modul Driver.....	10
Gambar 6. Pengujian GESITS di atas dynamometer	11
Gambar 7. Grafik Daya, Torsi, RPM Hasil Pengujian di atas Dynamometer	11
Gambar 8. GESITS Saat Pengujian Jalan Jakarta - Denpasar	12
Gambar 9. Model Sistem Kontrol Modular (existing)	12
Gambar 10. Tampilan Setting Parameter pada Software Interface Vedder	13
Gambar 11. Tipe-tipe Konstruksi Motor Listrik BLDC Aksial (Sumber: Duane Hanselman; 2003)	15
Gambar 12. Beberapa Prototype Motor Listrik BLDC Aksial Hasil Penelitian dan Pengembangan di ITS	16
Gambar 13. Komponen Motor Listrik BLDC Aksial 5 kW Hasil Penelitian dan Pengembangan di ITS	16
Gambar 14. Proses dalam Fuzzy Inference System	18
Gambar 15. Struktur Fuzzy PID Controller (Sumber : Guoqiang Cheng; 2012)..	20
Gambar 16. Block Diagram dari Kontrol Kecepatan untuk Motor BLDC dengan Fuzzy (Sumber : R. Arulmozhiyal, dkk; 2012).....	21
Gambar 17. Implementasi Fuzzy Logic pada Sistem Kontrol (Sumber : A. Albert, dkk; 2010)	22
Gambar 18. Blok Diagram Simulink Sistem Kontrol Modular dengan Fuzzy Logic	23



Gambar 19. Usulan Konsep Implementasi Fuzzy Logic pada Sistem Kontrol Modular untuk Motor Listrik BLDC Aksial di GESITS	24
Gambar 20. Fuzzy Inference System (Mamdani) GESITS.	25
Gambar 21. Rules FIS (Mamdani) GESITS	25
Gambar 22. Hasil Simulasi FIS (Mamdani) GESITS.....	26
Gambar 23. Diagram Alir Metode Penelitian dan Pengembangan Sistem Kontrol Modular untuk Motor Listrik BLDC Aksial.....	27
Gambar 24. Tampilan User Interface dari Software Sistem Kontrol Modular saat ini	29
Gambar 25. Tampilan User Interface Fuzzy Logic yang akan Diimplementasikan pada Software Sistem Kontrol Modular untuk GESITS.....	29
Gambar 26. Tampilan Eclipse IDE C/C++.....	35
Gambar 27. Throttle Membership Functions	37
Gambar 28. Membership functions RPM.....	38
Gambar 29. Membership functions PWM.....	39
Gambar 30. Fuzzy Rule	39
Gambar 31. Response Surface.....	40
Gambar 32. Tampilan Software Pembaca Tabel Fuzzy	42
Gambar 33. Proses Pengujian Sistem Kontrol Modular	43
Gambar 34. Sample 1 Pengujian Sistem Kontrol dengan Fuzzy	44
Gambar 35. Validasi Sample 1 Pengujian Sistem Kontrol dengan Fuzzy	44
Gambar 36. Sample 2 Pengujian Sistem Kontrol dengan Fuzzy	45
Gambar 37. Validasi Sample 2 Pengujian Sistem Kontrol dengan Fuzzy	45
Gambar 38. Sample 3 Pengujian Sistem Kontrol dengan Fuzzy	46
Gambar 39. Validasi Sample 3 Pengujian Sistem Kontrol dengan Fuzzy	46
Gambar 40. Sample 1 Pengujian Sistem Kontrol tanpa Fuzzy.....	47
Gambar 41. Validasi Sample 1 Pengujian Sistem Kontrol tanpa Fuzzy	47
Gambar 42. Sample 2 Pengujian Sistem Kontrol tanpa Fuzzy.....	48
Gambar 43. Validasi Sample 2 Pengujian Sistem Kontrol tanpa Fuzzy	48
Gambar 44. Sample 3 Pengujian Sistem Kontrol tanpa Fuzzy.....	49
Gambar 45. Validasi Sample 3 Pengujian Sistem Kontrol tanpa Fuzzy	49



DAFTAR TABEL

Tabel 1. Spesifikasi Sistem Kontrol Modular pada GESITS	9
Tabel 2. Parameter-parameter pada Software Interface Vedder	13
Tabel 3. Spesifikasi Motor Listrik BLDC Aksial 5 kW.....	17
Tabel 4. Fitur dan Spesifikasi Sistem Kontrol Modular	32
Tabel 5. Contoh Tabel Hasil Konversi Response Surface	41



Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Teknologi otomotif semakin hari semakin berkembang, kendaraan listrik menjadi salah satu primadona di bidang otomotif saat ini. Efisiensi yang lebih baik, performa yang terus meningkat, serta teknologi ramah lingkungan merupakan nilai tambah yang ditawarkan oleh kendaraan listrik. Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) tidak ingin ketinggalan dalam hal pengembangan teknologi kendaraan listrik. Salah satu upaya yang dilakukan adalah dengan melakukan riset dan pengembangan sepeda motor listrik yang diberi nama GESITS. Riset dan pengembangan untuk GESITS pun dilakukan dengan serius dan diwujudkan dengan penguasaan teknologi komponen utama pada sepeda motor listrik GESITS ini. Salah satu komponen utama yang terus menerus diteliti dan dikembangkan adalah sistem kontrol untuk motor listrik BLDC aksial pada GESITS. Sistem kontrol untuk motor listrik BLDC aksial ini sangat berpengaruh pada performa dan efisiensi dari motor listrik BLDC aksial atau GESITS secara keseluruhan. Sistem kontrol untuk motor listrik BLDC aksial pada GESITS bertipe sistem kontrol modular yang berfungsi untuk mengatur operasi dari motor listrik BLDC aksial.

Di akhir tahun 2016, GESITS telah melalui berbagai pengujian. Pengujian terkait performa dan efisiensi GESITS dilakukan dengan cara pengujian menggunakan *dynamometer* dan pengujian jalan sejauh kurang lebih 1400 km (Jakarta – Denpasar). Berdasarkan Laporan Akhir Pengujian Performa Sepeda Motor Listrik GESITS sesuai standar Internasional ISO 13064-2 dituliskan bahwa maksimum kecepatan yang dapat dicapai oleh GESITS yaitu 115 km/jam di atas *dynamometer* (Nur Yuniarto, dkk; 2016). Sedangkan untuk hasil pengujian jalan dari Jakarta menuju Denpasar diketahui bahwa kecepatan maksimum yang dicapai GESITS adalah 95 km/jam (Radar Bali, 2016). Konsumsi energi GESITS dari hasil pengujian tersebut juga menunjukkan hasil yang memuaskan yaitu rata-rata 20 km/kWh.



Akan tetapi tim peneliti merasa belum puas dengan hasil tersebut karena dirasa capaian performa GESITS yang sudah disebutkan tersebut masih belum maksimum. Capaian performa tersebut dikatakan belum maksimum karena tim peneliti mengalami kendala pada saat melakukan pengaturan parameter-parameter operasi dari sistem kontrol modular di GESITS melalui *software interface* yang diadopsi dari hasil pengembangan Benjamin (<http://vedder.se/>). Terdapat cukup banyak *field* untuk menentukan nilai parameter sehingga untuk mendapatkan konfigurasi parameter yang tepat membutuhkan waktu pengujian yang lama. Oleh sebab itu tim peneliti merasa bahwa konfigurasi parameter pada sistem kontrol modular saat ini belum tepat sehingga performa yang dihasilkan dirasa juga belum maksimum. Selain itu algoritma yang digunakan pada *firmware* sistem kontrol GESITS adalah algoritma *six step commutation* dengan peningkatan *pulse width modulation* (PWM) secara proporsional dan *linear* dengan *maximum ramping* yang terbatas guna mencapai target arus listrik yang ditentukan. Metode peningkatan PWM seperti itulah yang menyebabkan waktu akselereasi menjadi lama.

Permasalahan tersebut tentunya memerlukan solusi agar GESITS memiliki performa dan efisiensi yang lebih baik jika dibandingkan dengan sepeda motor konvensional berbahan bakar bensin. Penelitian dan pengembangan untuk meningkatkan performa dan efisiensi dari sistem kontrol untuk motor listrik BLDC sudah cukup banyak dilakukan. Salah satunya adalah dengan mengimplementasikan *Fuzzy Logic* pada sistem kontrol tersebut seperti yang dilakukan oleh Guoqiang Cheng pada tahun 2012 yaitu sistem kontrol untuk motor listrik BLDC berbasis *fuzzy* PID, selain itu R. Arulmozhiyal, dkk juga mendesain sistem kontrol untuk motor listrik berbasis *fuzzy* PID pada tahun 2012 juga, serta A. Albert (2010) yang mengusulkan optimasi switching dengan menggunakan *fuzzy logic* untuk mengurangi *harmonics* yang terjadi. Mereka menyatakan bahwa implementasi *Fuzzy Logic* dapat meningkatkan performa dan efisiensi dari sistem kontrol untuk motor listrik BLDC. Oleh sebab itu pada tesis ini penulis mengusulkan untuk melakukan pengembangan untuk sistem kontrol motor listrik BLDC aksial pada GESITS. Pengembangan yang dilakukan adalah dengan mengimplementasikan *Fuzzy Logic* pada sistem kontrol tersebut. Dengan mengimplementasikan *Fuzzy Logic* diharapkan prosedur pengaturan parameter



kerja dari sistem kontrol menjadi lebih mudah dan cepat sehingga performa dari motor listrik BLDC aksial pada sepeda motor listrik GESITS dapat meningkat.

1.2. Perumusan Masalah

1. Bagaimana cara untuk mengimplementasikan *Fuzzy Logic* pada sistem kontrol motor listrik BLDC aksial?
2. Bagaimana desain sistem kontrol untuk motor listrik BLDC aksial dengan *Fuzzy Logic*?
3. Apakah ada peningkatan performa dalam bentuk nilai output PWM (*pulse width modulation*) yang dihasilkan oleh sistem kontrol modular setelah *Fuzzy Logic* diimplementasikan?

1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian

1. Dapat mengimplementasikan *Fuzzy Logic* pada sistem kontrol untuk motor listrik BLDC aksial
2. Dapat mendesain sistem kontrol untuk motor listrik BLDC aksial dengan *Fuzzy Logic*
3. Mengetahui pengaruh implementasi *Fuzzy Logic* pada sistem kontrol untuk motor listrik BLDC aksial terhadap nilai output PWM (*pulse width modulation*) yang dihasilkan.

1.4. Batasan Masalah

1. *Fuzzy Logic* diimplementasikan pada sistem kontrol modular yang sudah ada.
2. Pengembangan dilakukan dengan modifikasi pada *software* dan *firmware* tanpa melakukan modifikasi *hardware* pada sistem kontrol modular yang sudah ada.
3. Pengukuran peningkatan performa dari motor listrik BLDC aksial akan dilakukan dengan cara membandingkan output nilai PWM (*pulse width modulation*) yang dihasilkan antara sistem kontrol modular dengan fuzzy logic dan dengan sistem kontrol modular tanpa fuzzy.



Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB 2

DASAR TEORI DAN STUDI LITERATUR

2.1. Traksi Sepeda Motor Listrik GESITS

Dalam ilmu dinamika kendaraan kebutuhan traksi kendaraan untuk melawan hambatan-hambatan yang timbul seperti hambatan angin, hambatan gesek, serta hambatan akibat jalan menanjak dapat dihitung dengan memodelkan kendaraan secara matematis dengan menguraikan gaya-gaya hambat yang timbul. Sama halnya dengan GESITS sebagai kendaraan listrik atau sepeda motor listrik lebih tepatnya perlu dilakukan permodelan kebutuhan traksi daripada GESITS itu sendiri untuk mengetahui kebutuhan daya yang diperlukan oleh GESITS untuk beroperasi dalam berbagai kondisi seperti dijalanan datar, jalanan menanjak, maupun pada saat berakselerasi. Gaya-gaya hambat yang timbul di GESITS saat beroperasi dapat digambarkan seperti pada Gambar 1 berikut.

Pada Gambar 1 di bawah dapat dilihat bahwa pada saat beroperasi GESITS akan melawan beberapa gaya hambat yang antara lain adalah gaya hambat akibat angin, gaya hambat akibat gesekan jalan, dan juga gaya hambat akibat kemiringan jalan serta inersia dari GESITS itu sendiri. Secara matematis gaya-gaya tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.



Gambar 1. Gaya hambat pada Sepeda Motor Listrik GESITS



- **Gaya Hambat Angin (Air Resistance Force)**

$$F_d = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (1)$$

dimana:

$\rho = \text{densitas udara } \left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$A = \text{luas penampang } (m^2)$

$C_d = \text{koefisien gaya hambat udara}$

$v = \text{kecepatan udara } \left(\frac{m}{s}\right)$

- **Gaya Hambat Gesek**

$$F_{rr} = \mu_{rr} m g \cos \theta \quad (2)$$

dimana:

$\mu_{rr} = \text{koefisien gesek roda}$

$m = \text{massa total } (kg)$

$g = \text{konstanta gravitasi } \left(\frac{m}{s^2}\right)$

$\theta = \text{sudut kemiringan jalan } (^{\circ})$

- **Gaya Hambat Kemiringan Jalan**

$$F_g = m g \sin \theta \quad (3)$$

- **Inersia**

$$F = m a \quad (4)$$

dimana:

$a = \text{percepatan kendaraan } \left(\frac{m}{s^2}\right)$

Dari persamaan-persamaan di atas dapat dihasilkan bahwa total gaya hambat adalah.

$$F_t = F + F_g + F_{rr} + F_d \quad (5)$$



Sedangkan hubungan Daya, Torsi, RPM, Gaya, dan Kecepatan adalah sebagai berikut.

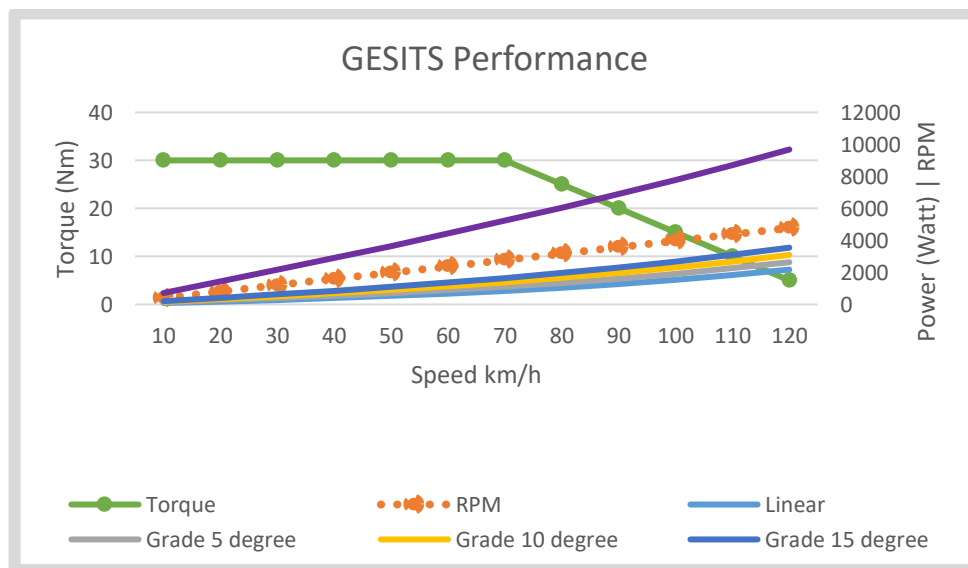
$$P = \tau \times \omega \quad (6)$$

$$P = F \times v \quad (7)$$

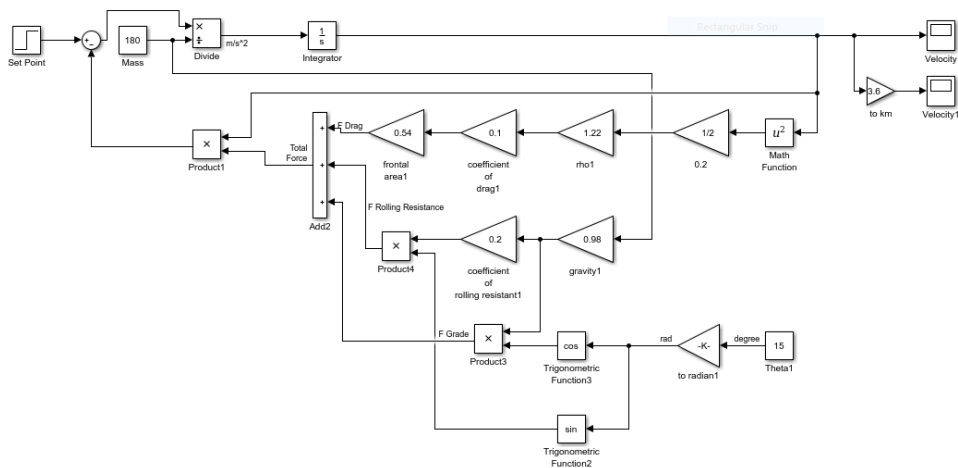
Dari hasil perhitungan secara matematis dengan menggunakan rumus-rumus di atas maka didapatkan grafik hubungan Torsi, RPM, Kecepatan, dan Daya dari GESITS untuk beberapa kondisi operasi seperti pada Gambar 2.

Berdasarkan Gambar 2, dapat dilihat bahwa kebutuhan daya semakin tinggi seiring meningkatnya kecepatan atau rpm motor. Selain itu peningkatan kemiringan jalan juga menunjukkan peningkatan kebutuhan daya yang signifikan.

Selain dimodelkan secara matematis dengan perhitungan konvensional, dinamika dari GESITS juga dapat dimodelkan dengan menggunakan bantuan software Simulink untuk selanjutnya disimulasi sehingga dapat diketahui berbagai nilai operasi dari GESITS berdasarkan hasil simulasi tersebut.



Gambar 2. Grafik hubungan Torsi, RPM, Kecepatan dan Daya GESITS berdasarkan perhitungan



Gambar 3. Blok Diagram Simulink dari Sepeda Motor Listrik GESITS

Permodelan dengan menggunakan Simulink dilakukan dengan membuat blok diagram yang menggambarkan sistem dari sepeda motor listrik tersebut. Berikut adalah gambar permodelan sepeda motor listrik GESITS dengan menggunakan Simulink.

2.2. Sistem Kontrol Modular untuk Motor Listrik BLDC Aksial

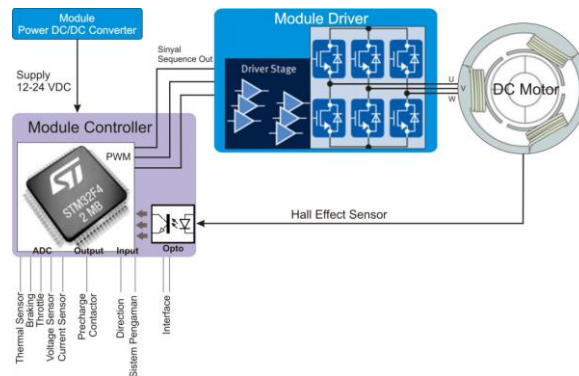
Sistem kontrol modular sudah cukup lama diteliti dan dikembangkan di ITS. Penelitian terkait sistem kontrol modular ini dimulai sejak tahun 2014. Secara umum sistem kontrol modular untuk motor listrik BLDC aksial yang dikutip dari Agus Mukhlisin (2014) terdiri dari beberapa komponen sebagai berikut:

- Electronic Control Unit (ECU)* atau biasa disebut dengan modul *controller* memiliki fungsi sebagai pengatur kerja *driver actuator*. Modul ini memiliki *port* untuk sinyal *input* dan *output*. Sinyal *input* meliputi sinyal dari *Hall Effect Sensor* (terpasang pada motor listrik BLDC aksial), *Throttle*, *Direction*, dan *Braking*. Sedangkan sinyal *output* yaitu sinyal *Pulse Width Modulation (PWM)*.
- Power Regulator* yang berfungsi untuk menyediakan *Supply Power* untuk modul *controller* agar dapat beroperasi sesuai dengan tegangan kerjanya. Biasanya regulator yang digunakan sejenis *Step Down Regulator* dengan metode *Switching*.



- c. *Driver* yang berfungsi menjalankan sinyal yang diterima dari modul *controller* untuk diteruskan ke *pole* motor. Pada motor berkapasitas menengah ke bawah biasanya menggunakan *Module Half Bridge Circuit* dengan komponen *Mosfet*, sedangkan untuk motor berkapasitas besar (10 kW – ke atas) biasanya memakai *Insulated-Gate Bipolar Transistor* (IGBT).
- d. Interface berfungsi untuk memonitor kondisi operasi *controller* agar *user* dapat mengetahui apakah sistem berjalan dengan normal. Komunikasi data dapat menggunakan *serial data*, *I2C*, *USART*, maupun *CAN communication*.

Gambar 4 di bawah merupakan konsep sistem kontrol modular yang dikembangkan oleh Agus Mukhlisin. Sesuai penjelasan sebelumnya bahwa terdapat empat komponen dari sistem kontrol modular, namun secara fisik sistem kontrol modular terdiri dari dua komponen utama saja yaitu modul



Gambar 4. Konsep Sistem Kontrol Modular untuk Motor Listrik BLDC Aksial

Tabel 1. Spesifikasi Sistem Kontrol Modular pada GESITS

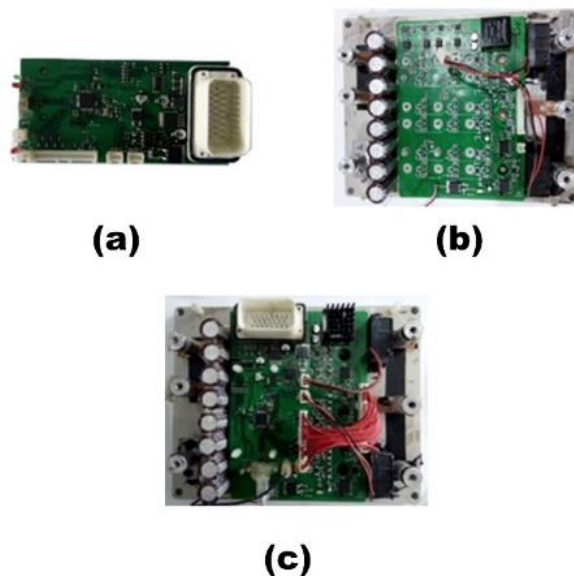
Value	Parameters
50 Ampere	Peak Input Current
250 Ampere	Peak Output Current
96 volt	Operating Voltage
Natural Air	Cooling System
90%	Efficiency



controller dan modul *drive*. Modul *power regulator* pada umumnya sudah terdapat pada sistem kelistrikan untuk kendaraan listrik sedangkan modul *Hall Effect Sensor* sudah menjadi satu kesatuan pada sistem motor listrik BLDC aksial.

Saat ini sistem kontrol modular untuk motor listrik BLDC aksial yang dikembangkan oleh Agus Mukhlisin seperti yang terlihat di Gambar 5 telah diaplikasikan di sepeda motor listrik GESITS. Spesifikasi dari sistem kontrol modular tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

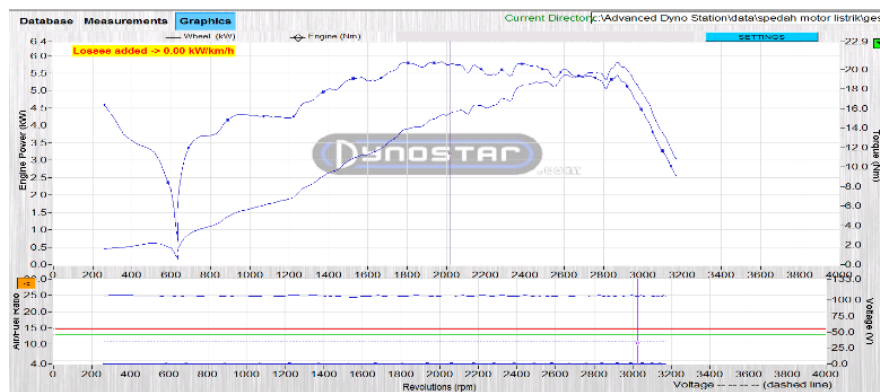
Performa dari sistem kontrol modular tersebut telah diuji dengan menggunakan *dynamometer* maupun dengan uji jalan pada GESITS untuk menggerakkan motor listrik BLDC aksial 5 kW. Gambar 6 menunjukkan proses pengujian GESITS di atas *dynamometer*. Dari hasil pengujian di atas *dynamometer* didapatkan hasil grafik yang ditunjukkan dengan Gambar 7. Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui bahwa sistem kontrol modular menghasilkan daya 5.8 kW pada putaran 2872 *rpm* dan torsi maksimum mencapai 20.8 *Nm* pada putaran 1975 *rpm*. Selain itu kecepatan maksimum yang dapat dicapai GESITS mencapai 115 km/jam.



Gambar 5. Prototype Sistem Kontrol Modular untuk Motor Listrik BLDC Aksial
(a) Modul Controller, (b) Modul Driver, (c) Assembly Modul Controller dan Modul Driver



Gambar 6. Pengujian GESITS di atas dynamometer

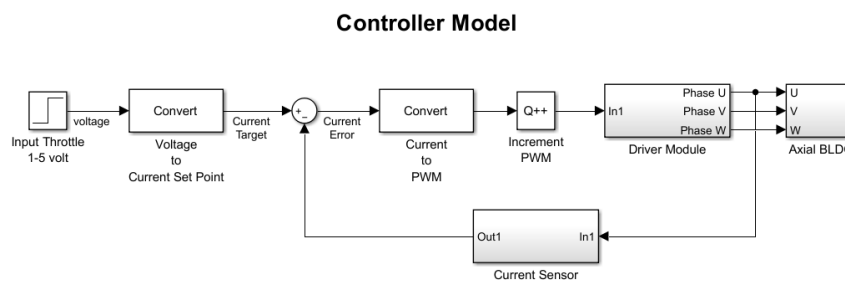


Gambar 7. Grafik Daya, Torsi, RPM Hasil Pengujian di atas Dynamometer

Sedangkan dari hasil pengujian jalan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 8, tercatat kecepatan maksimum yang pernah dicapai oleh GESITS selama perjalanan dari Jakarta menuju Denpasar adalah sekitar 95 km/jam. Dari hasil kedua pengujian performa yang telah dilakukan terhadap GESITS yaitu dengan pengujian di atas *dynamometer* dan pengujian jalan dapat disimpulkan bahwa GESITS telah menunjukkan performa yang baik dalam hal daya, torsi, dan kecepatan maksimum yang dapat dicapai sebagai *prototype* sepeda motor listrik. Akan tetapi capaian performa tersebut dikatakan belum maksimum karena tim peneliti mengalami kendala pada saat melakukan pengaturan parameter-parameter operasi dari sistem kontrol modular di GESITS melalui *software interface* yang diadopsi dari hasil pengembangan Benjamin (<http://vedder.se/>). Terdapat cukup banyak *field* untuk menentukan nilai parameter sehingga untuk mendapatkan konfigurasi parameter yang tepat



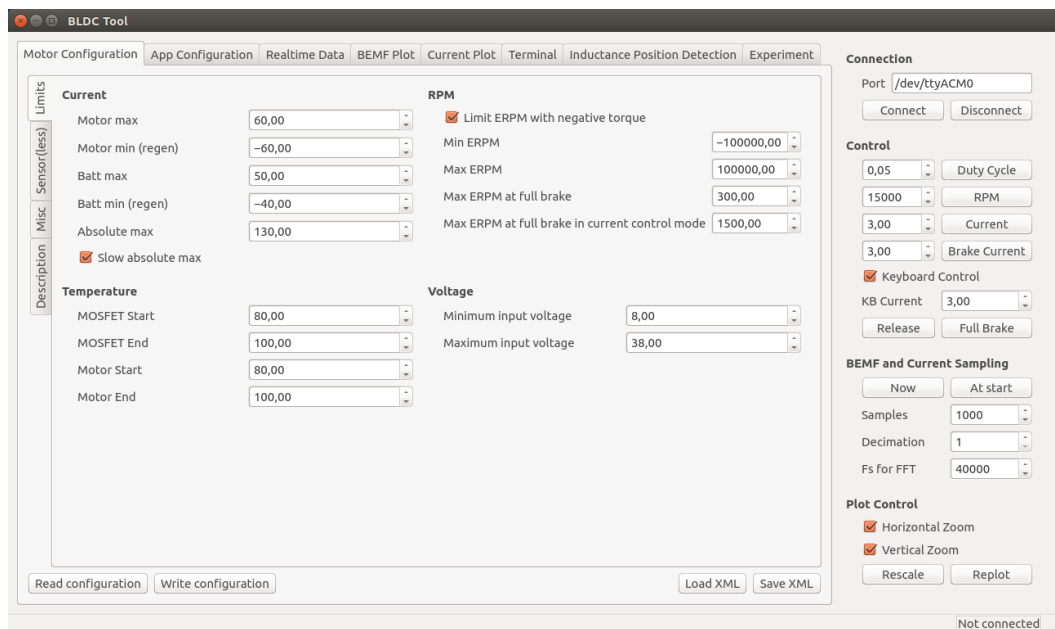
Gambar 8. GESITS Saat Pengujian Jalan Jakarta - Denpasar



Gambar 9. Model Sistem Kontrol Modular (existing)

membutuhkan waktu pengujian yang lama. Oleh sebab itu tim peneliti merasa bahwa konfigurasi parameter pada sistem kontrol modular saat ini belum tepat sehingga performa yang dihasilkan dirasa juga belum maksimum. Selain itu algoritma yang digunakan pada *firmware* sistem kontrol GESITS adalah algoritma *six step commutation* dengan peningkatan *pulse width modulation* (PWM) secara proporsional dan *linear* dengan *maximum ramping* yang terbatas guna mencapai target arus listrik yang ditentukan. Metode peningkatan PWM seperti itulah yang menyebabkan waktu akselerasi menjadi lama pula. Secara sederhana model dari sistem kontrol yang sudah dikembangkan saat ini dapat dilihat pada Gambar 9.

Tingkat kerumitan setting parameter dari *software interface* milik vedder adalah pada banyaknya parameter yang harus ditentukan. Pada Gambar 10 dapat dilihat bahwa cukup banyak parameter yang perlu diatur sebelum sistem



Gambar 10. Tampilan Setting Parameter pada Software Interface Vedder

kontrol dapat digunakan. Selain itu diperlukan pengetahuan terkait motor listrik dan sistem kontrol yang cukup mendalam untuk dapat melakukan pengaturan-pengaturan parameter pada *software interface* milik vedder tersebut. Resiko yang dapat ditimbulkan apabila terjadi kesalahan pengaturan parameter maka sistem kontrol dapat mengalami kegagalan.

Berdasarkan Gambar 10 dapat diuraikan bahwa parameter-parameter yang perlu diatur pada sistem kontrol adalah sebagai berikut.

Tabel 2. Parameter-parameter pada Software Interface Vedder

No.	Parameter	Fungsi
1	Motor max	Membatasi arus maksimum pada motor listrik
2	Motor min	Membatasi arus minimum pada motor listrik
3	Batt max	Membatasi arus maksimum pada baterai
4	Batt min (regen)	Membatasi arus minimum pada baterai (pada saat regen)
5	Absolute max	Membatasi arus absolut maksimum

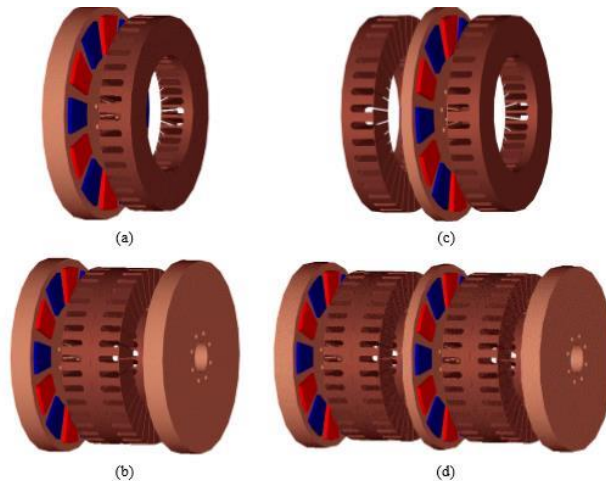


6	MOSFET Start	Membatasi temperatur maksimum pada MOSFET pada saat awal
7	MOSFET End	Membatasi temperatur maksimum pada MOSFET di akhir
8	Motor Start	Membatasi temperatur maksimum dari Motor pada saat awal
9	Motor End	Membatasi temperatur maksimum dari Motor pada saat akhir
10	Min ERPM	Membatasi putaran motor minimum
11	Max ERPM	Membatasi putaran motor maksimum
12	Max ERPM at full brake	Membatasi putaran motor maksimum pada saat pengereman penuh
13	Max ERPM at full brake in current control mode	Membatasi putaran motor maksimum pada saat pengereman penuh dalam mode kontrol arus
14	Minimum input voltage	Membatasi tegangan input minimum dari baterai
15	Maximum input voltage	Membatasi tegangan input maksimum dari baterai

2.3. Motor Listrik BLDC Aksial

Motor listrik dengan model aksial pertama kali ditemukan oleh Faraday pada tahun 1821. Motor listrik jenis ini cukup banyak diaplikasikan pada kendaraan listrik karena memiliki torsi tinggi dan dimensi yang lebih kecil jika dibandingkan dengan motor listrik jenis lain yang dayanya sama.

Motor listrik BLDC aksial dirancang untuk dapat mengalirkan flux secara aksial. Dalam aplikasi kendaraan listrik penggunaan konstruksi secara aksial diperlukan untuk menyesuaikan keterbatasan ruang yang ada. Terdapat beberapa jenis konstruksi yang biasa digunakan dalam konstruksi motor listrik BLDC aksial yang ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Tipe-tipe Konstruksi Motor Listrik BLDC Aksial (Duane Hanselman; 2003)

Adapun komponen-komponen dari motor listrik BLDC aksial adalah sebagai berikut:

1) Stator

Stator dari motor listrik BLDC aksial biasanya terdiri dari core dan lilitan kawat tembaga. Core pada umumnya terbuat dari laminasi baja yang ditumpuk-tumpuk. Kemudian kawat tembaga akan dililitkan dengan pola tertentu pada core tersebut.

2) Rotor

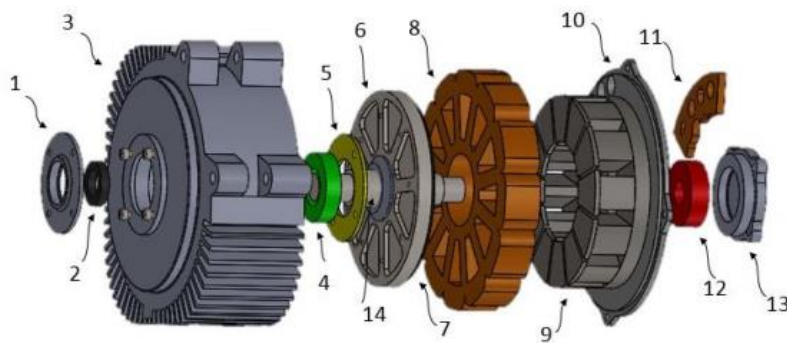
Rotor merupakan bagian utama dari motor listrik BLDC aksial selain stator. Pada rotor terdapat beberapa bagian seperti magnet dan casing.

3) Hall Sensor

Sensor hall efek adalah transducer yang menghasilkan output berupa tegangan yang bervariasi sebagai respon terhadap medan magnet. Sensor ini digunakan untuk menentukan orientasi posisi rotor. Pada umumnya terdapat 3 sensor hall effect pada motor listrik BLDC aksial. Ketiga sensor tersebut disusun secara terpisah 120 derajat satu dengan yang lainnya.



Gambar 12. Beberapa Prototype Motor Listrik BLDC Aksial Hasil Penelitian dan Pengembangan di ITS



Gambar 13. Komponen Motor Listrik BLDC Aksial 5 kW Hasil Penelitian dan Pengembangan di ITS

Saat ini para peneliti di ITS telah berhasil membuat beberapa *prototype* motor listrik BLDC aksial seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12. Motor listrik BLDC aksial hasil penelitian dan pengembangan peneliti di ITS saat ini sudah diaplikasikan di beberapa kendaraan listrik. Salah satunya kendaraan listrik yang menggunakan motor listrik BLDC aksial milik peneliti ITS adalah sepeda motor listrik GESITS. Motor listrik BLDC aksial yang dipasang di GESITS memiliki desain motor listrik BLDC aksial 5 kW. Konstruksi motor listrik BLDC aksial 5 kW yang dipasang di GESITS mirip dengan konstruksi motor listrik BLDC aksial pada umumnya dengan komponen-komponen penyusun yang sama seperti ditunjukkan pada Gambar 13.

Adapun spesifikasi dari motor listrik BLDC aksial 5 kW yang dipasang di GESITS ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.



Tabel 3. Spesifikasi Motor Listrik BLDC Aksial 5 kW

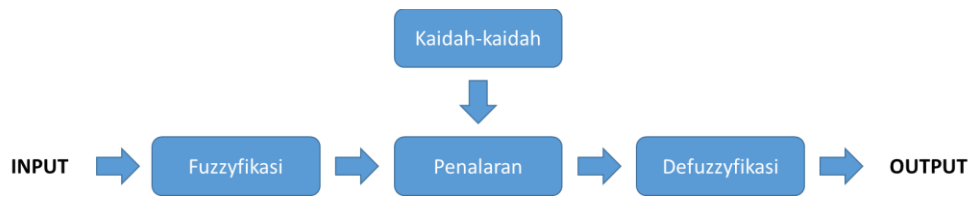
Parameters	Value
Operating Value	96 Volt
Rated Power	5000 Watt
Max Power	8000 Watt
Torque	18 Nm
Max Torque	30 Nm
RPM	4000 rpm
Efficiency	90%

2.4. Fuzzy Logic

Logika Fuzzy atau biasa disebut *Fuzzy Logic* pertama kali diperkenalkan oleh Lotfi Zadeh pada tahun 1965 dalam proposalnya yang berjudul *fuzzy set theory*. *Fuzzy Logic* adalah pengembangan dari logika Boolean yang berkaitan dengan konsep kebenaran sebagian. Pada logika klasik segala hal diekspresikan dalam istilah *biner* (0 atau 1, hitam atau putih, ya atau tidak), *Fuzzy Logic* menggantikan kebenaran Boolean dengan tingkat kebenaran.

Fuzzy Logic memungkinkan nilai keanggotaan antara 0 dan 1, tingkat keabuan dari hitam dan putih, serta konsep dalam bentuk linguistic dalam hal ketidakpastian seperti “sedikit”, “lumayan”, dan “sangat”. Oleh sebab itu *Fuzzy Logic* merupakan suatu cara yang tepat untuk memetakan suatu ruang input ke dalam ruang output. Untuk sistem yang sangat rumit, penggunaan *Fuzzy Logic* adalah salah satu solusi. Secara umum, *Fuzzy Logic* sangat cocok untuk penalaran pendekatan terutama untuk sistem yang menangani masalah-masalah yang sulit didefinisikan dengan menggunakan model matematis. Pada umumnya *Fuzzy Logic* memiliki 5 tahapan pada prosesnya, yaitu:

1. Memasukkan input *fuzzy*
2. Mengaplikasikan operator *fuzzy*
3. Mengaplikasikan metode implikasi
4. Komposisi semua output
5. Defuzifikasi



Gambar 14. Proses dalam Fuzzy Inference System

Fuzzy Logic mempunyai beberapa keuntungan bila dibandingkan dengan sistem logika klasik, misalkan pada jumlah aturan yang dipergunakan. Pemrosesan awal sejumlah besar nilai menjadi sebuah nilai derajat keanggotaan pada *Fuzzy Logic* mengurangi jumlah nilai menjadi sebuah nilai derajat keanggotaan pada *Fuzzy Logic* mengurangi jumlah nilai yang harus dipergunakan pengontrol untuk membuat suatu keputusan. Keuntungan lainnya adalah kemampuan penalaran yang mirip dengan kemampuan penalaran manusia yang dimiliki oleh *Fuzzy Logic*. Hal tersebut dikarenakan *Fuzzy Logic* mempunyai kemampuan untuk memberikan respon berdasarkan informasi yang bersifat kualitatif, tidak akurat, dan ambigu.

Fuzzy Inference System (FIS) adalah sistem yang dapat melakukan penalaran dengan prinsip seperti serupa manusia melakukan penalaran dengan nalurinya. Terdapat beberapa jenis FIS yang dikenal yaitu Mamdani, Sugeno, dan Tsukamoto. FIS yang paling mudah dimengerti, karena paling sesuai dengan naluri manusia adalah FIS Mamdani. FIS tersebut bekerja berdasarkan kaidah-kaidah linguistik dan memiliki algoritma *fuzzy* yang menyediakan sebuah aproksimasi untuk dimasuki analisa matematis.

Proses dalam FIS ditunjukkan pada Gambar 14. Input yang diberikan kepada FIS adalah berupa bilangan tertentu dan output yang dihasilkan juga harus berupa bilangan tertentu. Kaidah-kaidah dalam bahasa linguistik dapat digunakan sebagai input, yang bersifat teliti harus dikonversikan terlebih dahulu, lalu dilakukan penalaran berdasarkan kaidah-kaidah dan hasil penalaran dikonversi menjadi output yang sifatnya teliti.



2.4.1. Metode Mamdani

Metode Mamdani sering dikenal dengan nama metode Max-Min. Metode ini diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975. Untuk memperoleh output diperlukan 4 tahapan yaitu:

1) Pembentukan himpunan fuzzy

Pada metode mamdani, baik variable input maupun variable output dibagi menjadi satu atau lebih himpunan fuzzy.

2) Aplikasi fungsi implikasi (aturan)

Pada metode mamdani fungsi implikasi yang digunakan adalah MIN

3) Komponen aturan

Pada tahapan ini sistem terdiri dari beberapa aturan, maka keputusan diperoleh dari kumpulan dan korelasi antar aturan. Ada 3 metode yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem fuzzy, yaitu : MAX.

Pada metode max, solusi himpunan fuzzy diperoleh dengan cara mengambil nilai maksimum aturan, kemudian menggunakannya untuk memodifikasi daerah fuzzy, dan mengaplikasikannya ke output dengan menggunakan operator OR (union).

4) Penegasan (defuzzyfikasi)

Input dari proses defuzzyfikasi adalah suatu himpunan fuzzy yang diperoleh dari komposisi aturan-aturan fuzzy, sedangkan output yang dihasilkan merupakan suatu bilangan pada domain himpunan fuzzy tersebut.

2.5. Penelitian Terdahulu

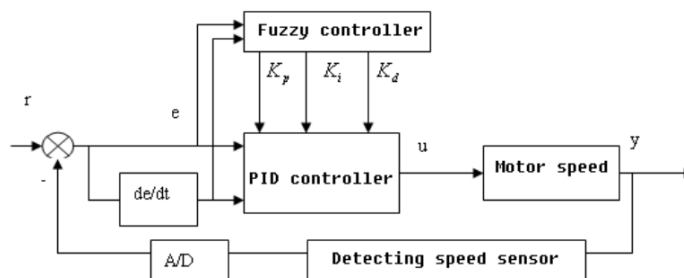
Penelitian dan pengembangan untuk meningkatkan performa dan efisiensi dari sistem kontrol untuk BLDC motor sudah banyak dilakukan sebelumnya. Berbagai metode diaplikasikan guna memperoleh peningkatan performa dan efisiensi. Salah satu metode yang banyak diaplikasikan adalah dengan mengimplementasikan atau menambahkan *Fuzzy Logic* pada sistem kontrol tersebut. Mengingat bahwa *Fuzzy Logic* merupakan salah satu logika cerdas yang lebih baik dari pada logika klasik. Berikut adalah beberapa penelitian dan pengembangan terdahulu terkait aplikasi *Fuzzy Logic* pada sistem kontrol untuk BLDC motor yang pernah dilakukan.



2.5.1. Brushless DC Motor Speed Control System Based on Fuzzy PID

Controller

Guoqiang Cheng (2012) dalam papernya yang berjudul *Brushless DC Motor Speed Control System Based on Fuzzy PID Controller* menyampaikan bahwa beliau telah melakukan penelitian dan pengembangan terhadap sistem kontrol untuk BLDC motor dengan mengimplementasikan *Fuzzy Logic*. Sistem kontrol yang awalnya hanya menggunakan *PID controller*, oleh Guoqiang dimodifikasi dengan menambahkan *Fuzzy Controller* yang berfungsi untuk mengubah-ubah nilai parameter K_p , K_i , dan K_d dari *PID controller*. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15, Guoqiang melakukan penelitian ini dengan metode simulasi, dimana beliau membandingkan hasil simulasi dari sistem sebelumnya dengan sistem yang telah dimodifikasi. Hasil perbandingan simulasi yang dilakukan oleh Guoqiang Cheng didapatkan kesimpulan bahwa penambahan *Fuzzy Logic* pada *PID controller* dapat menghasilkan performa yang lebih baik seperti *torque ripple* yang kecil, tidak terjadi *overshoot*, sistem menjadi lebih stabil, dan *robust*.



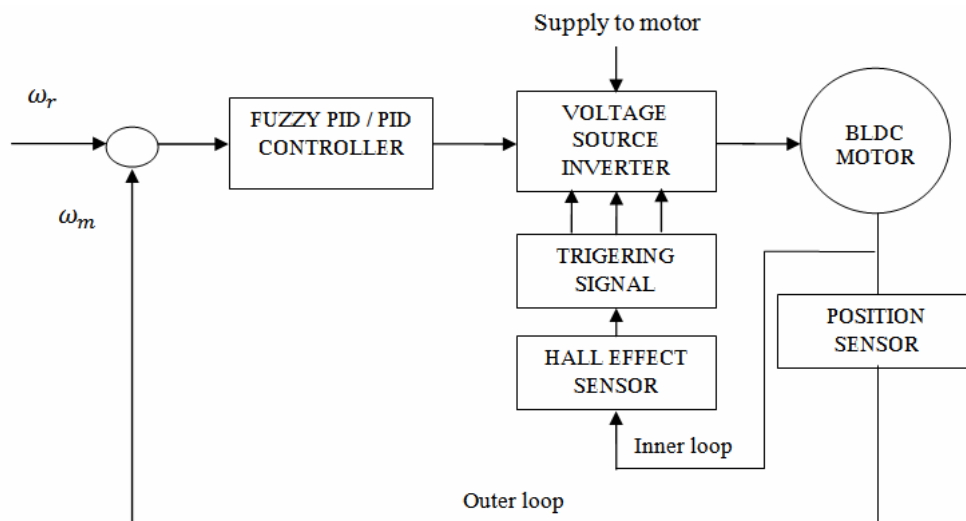
Gambar 15. Struktur Fuzzy PID Controller (Guoqiang Cheng; 2012)

2.5.2. Design of Fuzzy PID Controller Brushless DC Motor

Pada tahun 2012, R. Arulmozhiyal, dkk juga melakukan penelitian dan pengembangan untuk meningkatkan performa dari sistem kontrol untuk motor listrik BLDC. Dalam paper mereka yang berjudul *Design of Fuzzy PID Controller for Brushless DC Motor*, sistem kontrol konvensional dengan *PID controller* mereka modifikasi dengan menambahkan *Fuzzy Logic* di dalamnya. Penelitian dan pengembangan tersebut dilakukan dengan tujuan untuk melihat apakah ada peningkatan performa dari sistem kontrol setelah *Fuzzy Logic* diimplementasikan.



Selain itu, latar belakang lain yang mendasari penelitian dan pengembangan mereka adalah karena dengan sistem kontrol tradisional atau dalam hal ini sistem kontrol untuk motor listrik BLDC dengan PID *controller* cukup susah untuk dikonfigurasi. Menurut mereka, perlu pengetahuan yang mendalam terhadap sistem agar mampu melakukan konfigurasi parameter dari PID *controller*. Oleh sebab itu mereka mengusulkan untuk menggabungkan *Fuzzy Logic* dengan PID *controller*

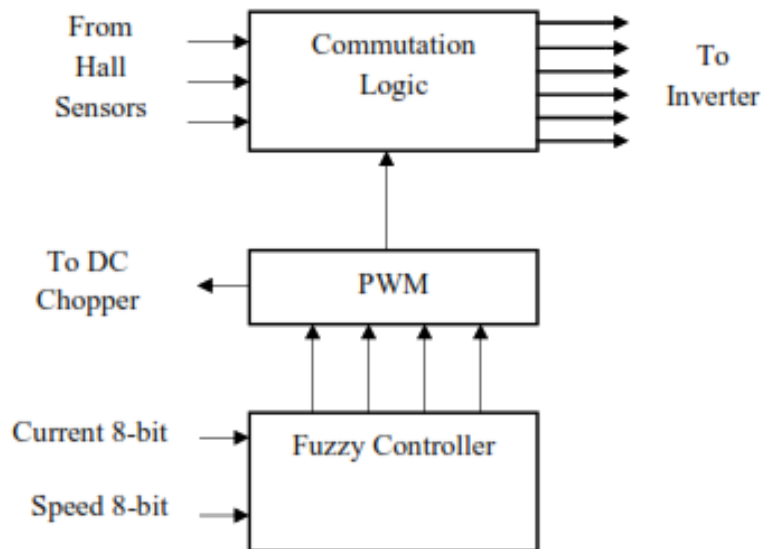


Gambar 16. Block Diagram dari Kontrol Kecepatan untuk Motor BLDC dengan Fuzzy (R. Arulmozhiyal, dkk; 2012)

seperti pada Gambar 16 untuk memudahkan proses pengaturan konfigurasi parameter dari PID *controller*. Metode yang mereka lakukan untuk melihat peningkatan performa adalah dengan melakukan simulasi terhadap sistem kontrol tradisional dengan PID *controller* yang kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi sistem kontrol yang telah dimodifikasi menjadi *Fuzzy PID controller*. Hasil simulasi yang mereka lakukan didapatkan kesimpulan bahwa sistem kontrol dengan *Fuzzy PID controller* memiliki performa yang lebih baik jika dibandingkan dengan sistem kontrol tradisional yang hanya menggunakan PID *controller* saja.



2.5.3. Fuzzy Logic Based Reconfigurable Optimal Switching Controller for BLDC Motor for Reduced Harmonics



Gambar 17. Implementasi Fuzzy Logic pada Sistem Kontrol (A. Albert, dkk; 2010)

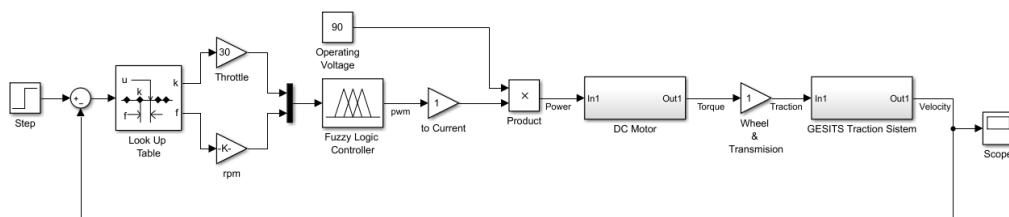
A. Albert Rajan (2010), melakukan penelitian dan pengembangan yang berkaitan dengan sistem kontrol untuk BLDC motor dengan *Fuzzy Logic*. Sistem yang diusulkan oleh Albert, dkk ini sedikit berbeda apabila dibandingkan dengan dua penelitian yang telah dibahas sebelumnya. Sesuai dengan judul paper mereka yaitu *Fuzzy Logic Based Reconfigurable Optimal Switching Controller for BLDC Motor for Reduced Harmonics*, mereka mengaplikasikan *Fuzzy Logic* untuk mengoptimalkan *switching* PWM agar untuk meminimalisir *harmonics*. *Harmonics* timbul akibat pembebanan listrik yang tidak *linear*. Fenomena ini tentunya akan selalu ditemui dilapangan sehingga diperlukan usaha untuk menurunkan *harmonics*. Optimalisasi *switching* PWM dengan menggunakan *Fuzzy Logic* diusulkan oleh Albert, dkk. *Fuzzy Logic* digunakan untuk menentukan nilai PWM yang optimal sesuai dengan usulan konsep yang ditunjukkan pada Gambar 17. Hasil simulasi yang dilakukan oleh Albert, dkk, didapatkan kesimpulan bahwa penurunan *total harmonic distortion* mencapai 57%.



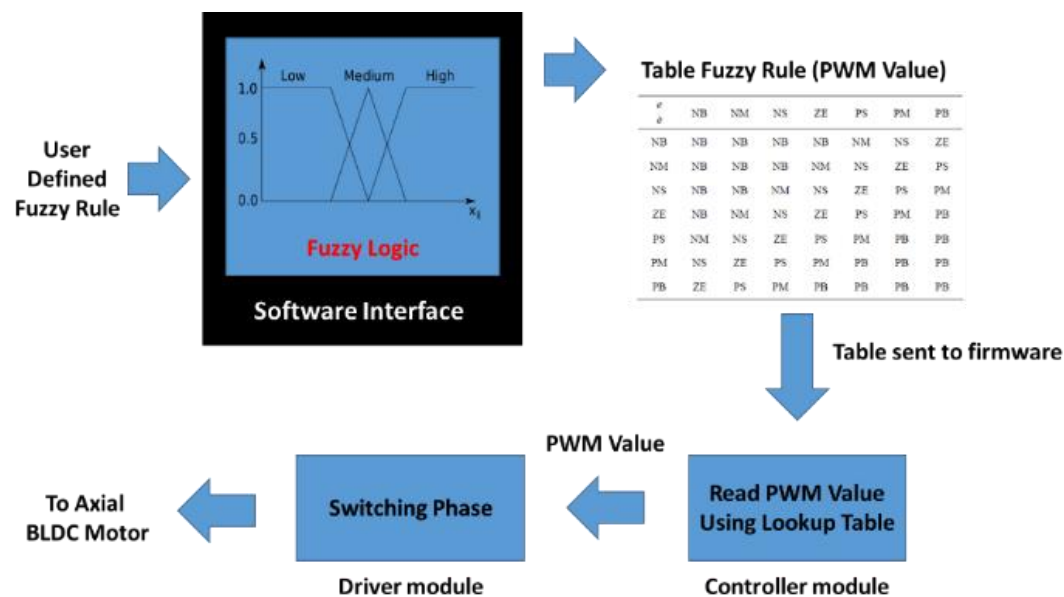
2.6. Usulan Konsep Pengembangan

Berdasarkan dari hasil studi literatur penelitian-penelitian terdahulu yang sudah dibahas pada sub-bab sebelumnya dapat disimpulkan bahwa implementasi *Fuzzy Logic* dapat meningkatkan performa dari sistem kontrol untuk motor listrik BLDC. Oleh sebab itu penulis, melalui tesis ini mengusulkan untuk mengimplementasikan *Fuzzy Logic* pada sistem kontrol modular untuk motor listrik BLDC aksial yang terpasang di sepeda motor listrik GESITS. Usulan ini bertujuan untuk mempermudah *user* dalam melakukan pengaturan parameter-parameter operasi dari sistem kontrol modular dengan harapan dapat meningkatkan performa dari sepeda motor listrik GESITS dan juga untuk meningkatkan akselerasi dari GESITS.

Bentuk implementasi *Fuzzy Logic* yang diusulkan pada tesis ini berbeda dengan penelitian dan pengembangan yang sudah pernah dilakukan sebelumnya. Apabila kita tinjau ulang penelitian terdahulu pada sub-bab sebelumnya mereka mengimplementasikan *Fuzzy Logic* di level *firmware* untuk *microcontroller* dari modul *controller*. Sedangkan yang penulis usulkan pada tesis ini adalah implementasi *Fuzzy Logic* pada level *software interface* untuk sistem kontrol modular untuk motor listrik BLDC aksial. Lebih detail lagi, output dari *Fuzzy Logic* di *software interface* akan menghasilkan tabel *fuzzy rule* yang berisi nilai PWM di setiap *rpm* dan bukaan *throttle* tertentu. Tabel *fuzzy rule* inilah yang kemudian akan dikirimkan dan disimpan pada *firmware*. Pada saat beroperasi, sistem kontrol modular akan membaca tabel tersebut berdasarkan hasil pembacaan *rpm* dan bukaan *throttle* aktual untuk menentukan output PWM yang diteruskan pada modul *driver*. Untuk memperoleh hasil pembacaan tabel *fuzzy rule* yang akurat juga



Gambar 18. Blok Diagram Simulink Sistem Kontrol Modular dengan Fuzzy Logic

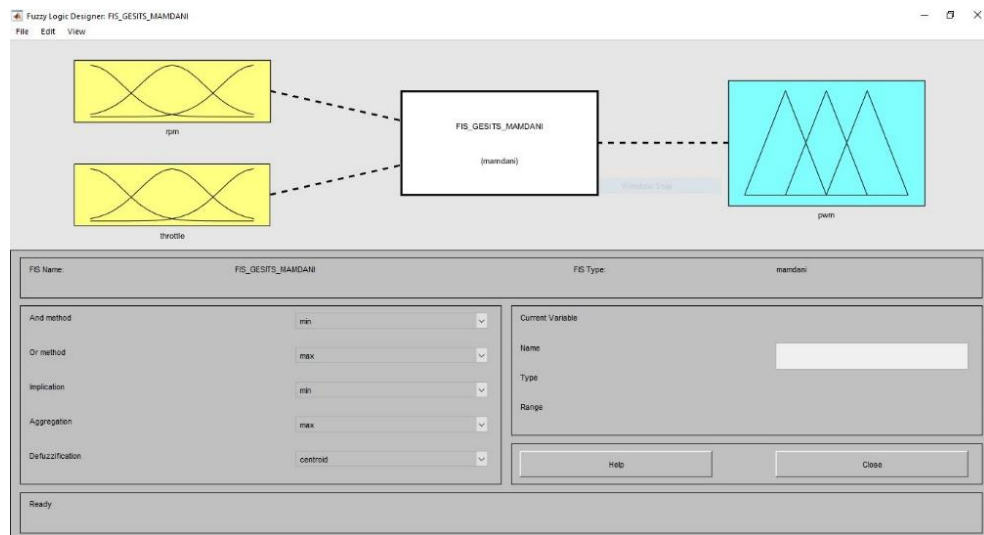


Gambar 19. Usulan Konsep Implementasi Fuzzy Logic pada Sistem Kontrol Modular untuk Motor Listrik BLDC Aksial di GESITS

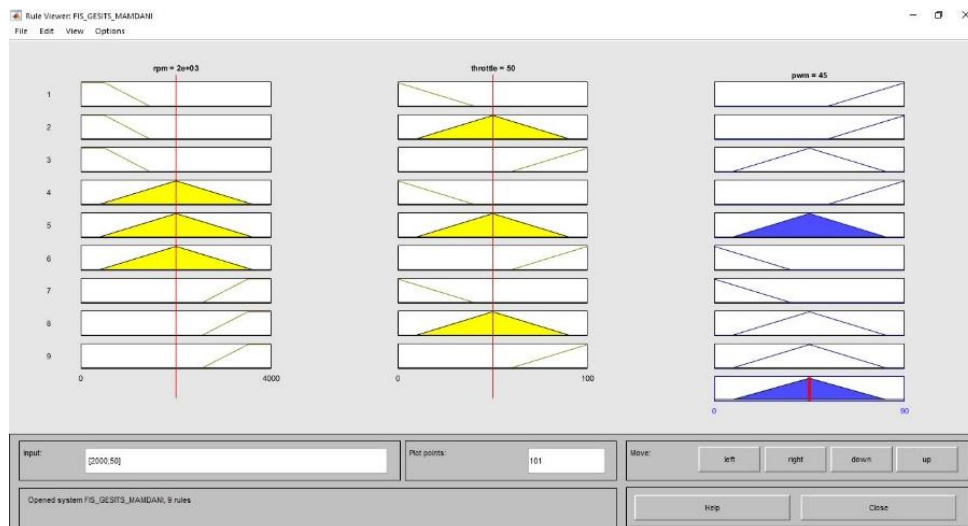
diperlukan algoritma lookup table yang tepat. Secara sederhana konsep tersebut dapat digambarkan seperti Gambar 19. Terkait *Fuzzy Inference System*, penulis memilih metode Mamdani karena metode ini lebih *intuitive*, lebih luas aplikasinya, dan lebih cocok dengan inputan dari manusia (<https://www.mathworks.com>).

Fuzzy Inference System untuk GESITS pada saat ini sudah memasuki tahap perancangan awal dengan menggunakan bantuan software *Fuzzy Logic Designer* yang terdapat di MATLAB. Dengan sistem yang terdiri dari dua input dan satu input maka dapat digambarkan seperti pada Gambar 20.

Dari Gambar 20 dapat dilihat bahwa terdapat dua inputan dan satu output pada FIS Mamdani untuk GESITS, nilai inputan adalah nilai rpm dan nilai throttle, sedangkan output yang dihasilkan adalah pwm (pulse width modulation). Adapun rules dari FIS tersebut dapat dilihat pada Gambar 21.

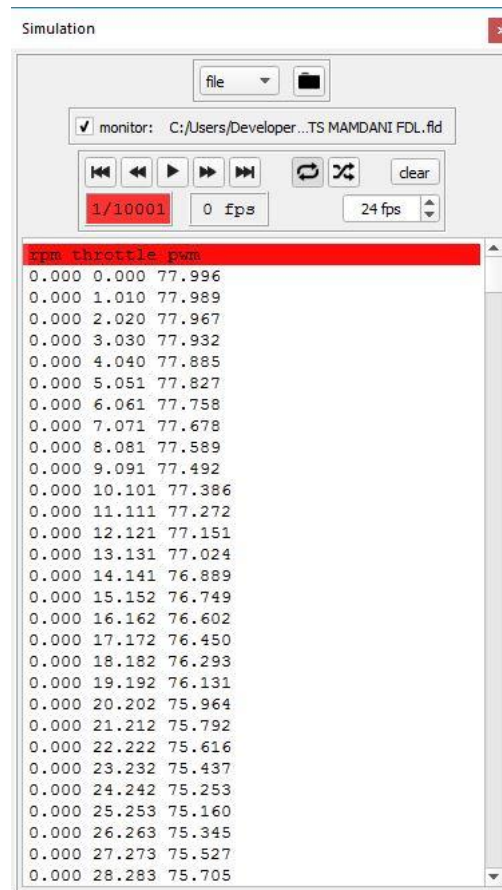


Gambar 20. Fuzzy Inference System (Mamdani) GESITS.



Gambar 21. Rules FIS (Mamdani) GESITS

Dari hasil rules pada Gambar 21 apabila disimulasikan akan didapatkan hasil pwm dari setiap pembacaan nilai rpm dan throttle seperti pada Gambar 22. Selanjutnya, setelah simulasi selesai dilakukan, tahapan yang perlu dilakukan adalah pengujian pada sistem kontrol modular dengan *Fuzzy Logic* yang terpasang pada sepeda motor listrik GESITS untuk mengetahui perubahan performa dari GESITS itu sendiri.



Gambar 22. Hasil Simulasi FIS (Mamdani) GESITS

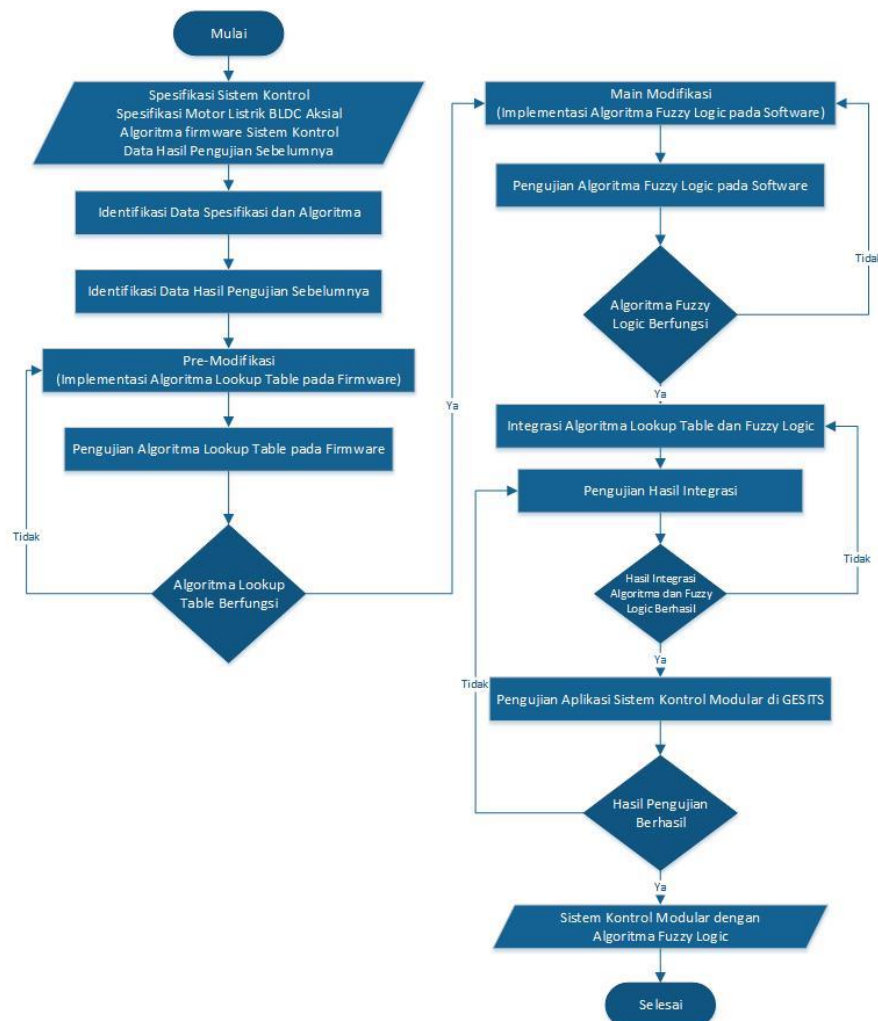


BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Teknik Pelaksanaan Penelitian

Terkait usulan pengembangan sistem kontrol modular untuk motor listrik BLDC aksial yang sudah dibahas pada BAB 2 sebelumnya, tentunya diperlukan metode untuk melaksanakan kegiatan tersebut. Adapun metode penelitian dan pengembangan dari sistem kontrol modular untuk motor listrik BLDC aksial ini digambarkan dengan diagram alir pada diagram alir berikut.



Gambar 23. Diagram Alir Metode Penelitian dan Pengembangan Sistem Kontrol Modular untuk Motor Listrik BLDC Aksial



3.1.1. Spesifikasi, Algoritma, dan Hasil Pengujian (Data Input)

Pada penelitian dan pengembangan ini file inputan yang didapatkan oleh penulis adalah spesifikasi dari sistem modular untuk motor listrik BLDC aksial yang ditunjukkan pada Tabel 1, kemudian spesifikasi dari motor listrik BLDC aksial itu sendiri sesuai Tabel 3, dan juga algoritma *firmware* untuk sistem kontrol modular. Data-data tersebut akan menjadi pondasi dasar arah penelitian dan pengembangan sistem kontrol modular untuk motor listrik BLDC aksial.

3.1.2. Identifikasi Spesifikasi dan Algoritma

Dokumen spesifikasi dan algoritma yang sudah didapatkan selanjutnya akan diidentifikasi dengan maksud mempelajari dan memahami dari sistem kontrol modular *existing*. Dengan mengetahui spesifikasi, model sistem, cara kerja, dan algoritma dari sistem kontrol modular ini diharapkan proses penelitian dan pengembangan sistem kontrol modular untuk motor listrik BLDC aksial dengan *Fuzzy Logic* dapat lebih cepat dan efisien.

3.1.3. Identifikasi Data Hasil Pengujian

Identifikasi hasil pengujian dari sistem kontrol modular untuk motor listrik BLDC aksial seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 juga diperlukan. Hasil identifikasi akan memberikan gambaran jelas permasalahan yang ada pada sistem kontrol modular *existing* dan juga dapat menjadi pembatas agar penelitian dan pengembangan ini tidak terlalu melebar.

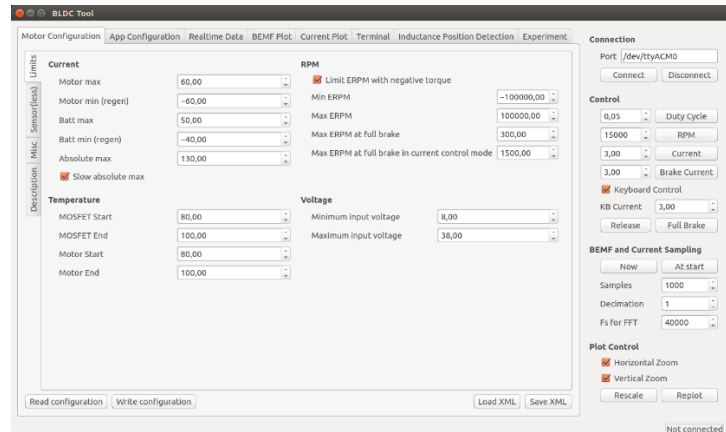
3.1.4. Pre-Modifikasi (Implementasi Algoritma *Lookup Table* pada *Firmware*)

Implementasi algoritma *Lookup Table* pada *firmware* merupakan tahapan awal yang perlu dilakukan sebelum melangkah pada implementasi *Fuzzy Logic*. Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa pengembangannya pada *firmware* dengan menambahkan algoritma *Lookup Table* dapat diaplikasikan. Penambahan algoritma *Lookup Table* dilakukan dengan memodifikasi *firmware* sistem kontrol modular *existing* yang kemudian dilanjutkan dengan pengujian pada sistem kontrol modular tersebut.

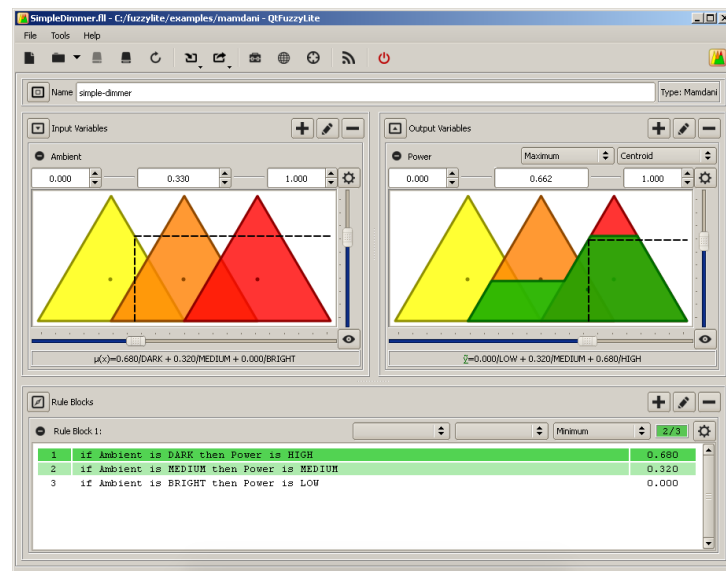


3.1.5. Modifikasi Utama (Implementasi Algoritma *Fuzzy Logic* pada *Software*)

Tahapan implementasi algoritma *Fuzzy Logic* dilakukan setelah hasil pengujian penambahan algoritma *Lookup Table* berhasil. *Fuzzy Logic*



Gambar 24. Tampilan User Interface dari Software Sistem Kontrol Modular saat ini



Gambar 25. Tampilan User Interface Fuzzy Logic yang akan Diimplementasikan pada Software Sistem Kontrol Modular untuk GESITS



diimplementasi pada pada *software* sistem kontrol modular dengan cara menambahkan algoritma *Fuzzy Logic* pada *source code* dari *software interface*. Implementasi ini akan mengubah *user interface* dari *software* sistem kontrol modular seperti pada Gambar 24 dimana cukup banyak *field* parameter yang harus ditentukan. Tampilan *user interface* sesuai Gambar 24 akan diubah menjadi simple dengan implementasi *Fuzzy Logic* sehingga tampilan *user interface* menjadi sederhana seperti Gambar 25. Dengan penyederhanaan tersebut diharapkan *user* dapat dengan mudah mengatur parameter kerja dari sistem kontrol modular. Selanjutnya juga perlu dilakukan modifikasi agar output berupa *table fuzzy rules* dapat dikirimkan ke *firmware* yang dipasangkan pada sistem kontrol modular.

3.1.6. Integrasi Algoritma *Lookup Table* dan *Fuzzy Logic*

Apabila *Fuzzy Logic* telah berhasil diimplementasikan pada *software interface* maka langkah selanjutnya adalah mengintegrasikan hasil implementasi *Lookup Table* dengan hasil implementasi *Fuzzy Logic*. Proses integrasi ini lebih kepada sinkronisasi data yang dihasilkan *Fuzzy Logic* pada level *software interface* yang berupa *table fuzzy rules* agar dapat dibaca oleh algoritma *Lookup Table* pada *firmware* sistem kontrol modular. Dan apabila proses integrasi telah dilakukan maka dapat dilanjutkan dengan pengujian untuk mengetahui peningkatan performa dan efisiensi dari sistem kontrol modular untuk motor listrik BLDC aksial setelah dikembangkan dengan implementasi *Fuzzy Logic*. Pengujian akan dilakukan dengan menggunakan *dynamometer* dengan output berupa grafik hubungan daya, torsi dan *rpm* seperti Gambar 7. Output grafik hasil pengujian setelah implementasi akan dibandingkan dengan output grafik pengujian sebelumnya.



BAB 4

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab 4 ini berisi analisa dan pembahasan data dari hasil penelitian. Data yang dihasilkan dari penelitian ini adalah data kuantitatif yang berisi informasi terkait performa dari motor listrik yang diuji dengan menggunakan sepeda motor listrik di atas. Data yang dihasilkan dari penelitian ini adalah data kuantitatif yang berisi informasi terkait performa dari motor listrik yang diuji dengan menggunakan sepeda motor listrik di atas *dynamometer*. Hasil pengujian sepeda motor listrik dengan menggunakan *dynamometer* berupa grafik kurva performa motor listrik berupa Daya (Watt/HP) dari hubungan antara kecepatan putaran (RPM) dengan Torsi (Nm). Dengan grafik kurva performa tersebut dapat diketahui profil daya yang dihasilkan oleh motor listrik secara keseluruhan dari putaran nol hingga maksimum dan torsi nol hingga maksimum. Dari profil tersebut dapat diketahui nilai daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh motor listrik. Daya maksimum muncul pada putaran tertentu dan torsi tertentu. Peningkatan performa, dalam hal ini adalah daya yang dihasilkan oleh motor listrik berdasarkan dari besarnya arus yang dialirkan dari sistem kontrol menuju ke motor listrik. Besaran arus yang dialirkan ditentukan oleh suatu nilai PWM (*pulse width modulation*) yang merepresentasikan durasi pengaliran arus listrik. Sesuai dengan usulan penelitian pada bab sebelumnya yaitu implementasi Fuzzy Logic pada sistem kontrol berguna untuk melakukan perhitungan tepat agar nilai PWM yang dihasilkan selalu tepat sehingga durasi pengaliran arus listrik dari sistem kontrol menuju ke motor listrik dapat menghasilkan besaran arus sesuai kebutuhan berdasarkan hasil pembacaan posisi throttle dan rpm.

4.1. Hasil Identifikasi Spesifikasi dan Algoritma

Sebelum dilakukan proses penelitian dan pengembangan dari sistem kontrol modular untuk sepeda motor listrik, terlebih dahulu perlu dilakukan proses identifikasi dari spesifikasi dan algoritma sistem kontrol modular. Proses



identifikasi cukup penting untuk dilakukan mengingat bahwa penelitian dan pengembangan yang akan dilakukan terhadap sistem kontrol modular dalam tesis ini bertujuan untuk memperbaiki kelemahan dari sistem kontrol modular saat ini. Dari hasil proses identifikasi didapatkan beberapa informasi terkait spesifikasi dan algoritma dari sistem kontrol modular saat ini.

4.1.1. Spesifikasi Sistem Kontrol Modular

Spesifikasi sistem kontrol modular secara umum adalah sistem kontrol untuk motor listrik BLCD. Sistem kontrol tersebut dapat digunakan pada motor listrik BLDC hingga daya maksimum 5 kW. Secara detail spesifikasi dapat dilihat pada Tabel 4.

4.1.2. Algoritma Sistem Kontrol Modular

Proses identifikasi algoritma dilakukan dengan mempelajari source code dari *firmware* pada sistem kontrol modular. Dari hasil pembacaan dan pemahaman source code tersebut dapat dipahami logika proses kerja dari sistem modular. Secara garis besar algoritma *firmware* dari sistem kontrol modular saat ini dapat digolongkan sebagai algoritma sederhana yang cukup konvensional. Hal ini dikarenakan logika program yang digunakan pada *firmware* tersebut hanya menggunakan logika sederhana untuk dapat menghasilkan output yang diinginkan. Logika sederhana tersebut berupa penjumlahan dan pengurangan nilai parameter output. Penjumlahan dan pengurangan ditentukan berdasarkan hasil perhitungan yang dibandingkan

Tabel 4. Fitur dan Spesifikasi Sistem Kontrol Modular

Fitur dan Spesifikasi Sistem Kontrol Modular
IP66 Protection
Overheat Protection
CAN enabled communication
Voltage and Current Limit Protection
Fully Programmable over USB Communication



Operating Voltage : 96V (120V max)
Peak Output Current : 240 A
Input Current : 60A

dengan nilai target yang telah ditentukan. Apabila hasil perhitungan masih kurang dari nilai target maka program akan menambahkan hasil perhitungan terus menerus hingga mencapai target. Sedangkan apabila hasil perhitungan melebihi nilai target maka nilai hasil perhitungan akan dikembalikan menjadi nol. Adapun pseudocode dari algoritma tersebut adalah sebagai berikut.

```
‘=====’,  
read target value  
set initial output value to 0  
while (initial output < target value)  
    initial output = initial output + 1  
    if (initial output > target value)  
        initial output = 0  
    end if  
end  
‘=====’,
```

Algoritma perhitungan untuk mendapatkan nilai output sesuai dengan nilai target seperti di atas memiliki cukup banyak kelemahan. Beberapa diantaranya adalah proses perhitungan yang lama, sangat sulit untuk mendapatkan nilai output yang sesuai dengan nilai target apabila nilai target berubah-ubah, serta tingkat akurasi yang rendah.

Dalam aplikasi kendaraan listrik atau sepeda motor listrik dalam kasus tesis ini, sebetulnya algoritma tersebut kurang sesuai karena nilai target output yang merupakan *dutycycle* dari PWM (*pulse width modulation*) yang merepresentasikan durasi pengaliran arus listrik dari sistem kontrol menuju ke motor listrik berubah-ubah karena dipengaruhi berbagai macam kondisi seperti kondisi jalan, kondisi beban, dan kebutuhan pengendara. Dengan algoritma seperti itu, profil kecepatan



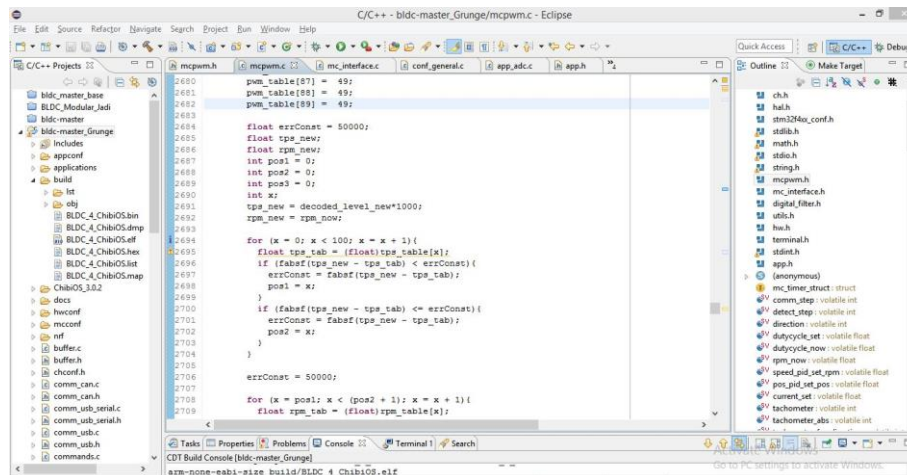
yang dihasilkan cenderung linear sehingga sedangkan kebutuhan profil kecepatan secara umum tidak dapat ditentukan bergantung kepada kebutuhan pengendara.

4.2. Hasil Identifikasi Data Hasil Pengujian

Sebelumnya sistem kontrol modular pada sepeda motor listrik telah diuji dengan berbagai metode dan alat pengujian seperti yang sudah sempat dibahas pada Sub Bab 2.2 di Bab 2 tentang Sistem Kontrol Modular untuk Motor Listrik BLDC Aksial. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan bahwa sistem kontrol modular pada sepeda motor listrik dapat menghasilkan output berupa kecepatan maksimum sepeda motor listrik yang dapat dicapai adalah 95 km/jam pada pengujian jalan dan 115 km/jam saat pengujian *dynamometer*. Namun berdasarkan hasil diskusi dengan tim penguji didapatkan informasi bahwa untuk mencapai kecepatan maksimum tersebut diperlukan waktu yang cukup lama (jika dibandingkan dengan sepeda motor konvensional/bukan listrik). Hal tersebut sesuai dengan hasil analisa pada sub bab sebelumnya terkait identifikasi algoritma. Penyebab lamanya durasi untuk mencapai kecepatan maksimum memang diakibatkan dari algoritma pada *firmware* yang menghasilkan output linear dalam mencapai target yang ditentukan.

4.3. Pre-Modifikasi (Implementasi Algoritma Lookup Table pada Firmware)

Setelah didapatkan informasi dari hasil identifikasi sistem kontrol modular baik dari sisi spesifikasi, algoritma, maupun hasil pengujiannya maka proses lanjutan yang dilakukan adalah melakukan modifikasi awal pada *firmware* di sistem kontrol modular. Modifikasi awal yang dilakukan adalah dengan menambahkan algoritma lookup table yang selanjutnya akan menggantikan algoritma sederhana penjumlahan dan pengurangan nilai sebelumnya. *Firmware* untuk sistem kontrol modular ditulis dengan menggunakan bahasa pemrograman C yang memang umum digunakan untuk program-program yang berjalan di level *hardware*. Penulisan program dengan bahasa C dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai *framework* atau yang lebih populer dikenal sebagai IDE (*Integrated Development Platform*). Modifikasi penambahan algoritma lookup table pada sistem kontrol ini



Gambar 26. Tampilan Eclipse IDE C/C++

menggunakan Eclipse IDE C/C++ seperti pada Gambar 26. Eclipse IDE C/C++ cukup populer digunakan dikalangan programmer untuk menulis program dalam bahasa C yang ditanamkan pada microcontroller.

Algoritma lookup table ditanamkan pada main program dari *firmware* untuk menentukan nilai output PWM sesuai dengan target yang diinginkan. Nilai output PWM didapatkan dengan membaca tabel yang berisi dengan tiga parameter yaitu 2 parameter input dan 1 parameter output. Parameter input adalah nilai posisi throttle dan nilai rpm, sedangkan parameter output adalah nilai PWM untuk setiap kombinasi dua nilai input yang dibaca. Algoritma lookup table ini akan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap dua nilai input dengan nilai-nilai input yang tersedia di dalam tabel. Algoritma ini akan mencoba mencari nilai dalam tabel tersebut dan membandingkannya dengan hasil pembacaan untuk selanjutnya dipilih nilai dengan error yang paling kecil apabila dibandingkan dengan nilai hasil pembacaan sensor. Kemudian algoritma ini akan menyimpan informasi lokasi dari nilai-nilai dengan error terkecil tersebut untuk selanjutnya digunakan dalam menentukan nilai output PWM berdasarkan lokasi yang telah direkam sebelumnya. Dalam kasus tesis ini, tabel yang dibaca oleh algoritma ini adalah tabel yang merupakan output dari Fuzzy Inference System sehingga tabel tersebut sudah memiliki informasi yang tepat terkait hubungan input dan output dengan digambarkan pada lokasi data dalam tabel tersebut. Adapun pseudocode dari algoritma lookup table ini adalah sebagai berikut.



```
'=====',  
  
read value1  
read value2  
error = Big Number  
  
for (i = 0; i < table size; i = i + 1)  
    if ([value1 - value1_tbl[i]] < error)  
        error = [value1 - value1_tbl[i]]  
        position1 = i  
    end if  
    if ([value1 - value1_tbl[i]] <= error)  
        error = [value1 - value1_tbl[i]]  
        position2 = i  
    end if  
next i  
  
error = Big Number  
  
for (i = position1; i < position2 + 1; i = i + 1)  
    if ([value2 - value2_tbl[i]] < error)  
        error = [value2 - value2_tbl[i]]  
        position3 = i  
    end if  
next i  
  
write output_value = value2_tbl[position3]  
  
'=====',
```

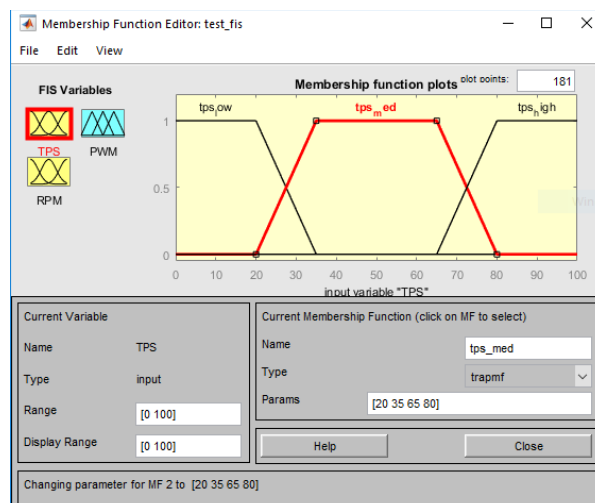
4.4. Modifikasi Utama (Implementasi Algoritma Fuzzy Logic pada Software)

Modifikasi utama secara prinsip bertujuan untuk menterjemahkan response surface dari Fuzzy Inference System menjadi suatu tabel yang nantinya akan



diproses oleh algoritma lookup table pada *firmware* sistem kontrol. Dalam tesis ini Fuzzy Inference System yang digunakan adalah metode Mamdani sesuai pada bahasan di Bab 2. Sedangkan *tool* yang digunakan untuk mendesain Fuzzy Logic adalah Fuzzy Logic Designer milik Matlab. Pada bahasan-bahasan sebelumnya telah disinggung bahwa Fuzzy Logic pada tesis ini digunakan untuk mengetahui nilai output PWM yang tepat untuk setiap kombinasi nilai *throttle* dan RPM yang terjadi. Sehingga FIS (Fuzzy Inference System) untuk kasus sistem kontrol pada tesis ini memiliki 2 input parameter dan 1 output parameter. 2 Input parameter tersebut adalah *throttle* dan RPM, sedangkan parameter outputnya adalah PWM. Dengan menggunakan *tool* Fuzzy Logic Designer, *membership functions* dari masing-masing parameter dapat dengan mudah dibuat karena sudah dilengkapi dengan GUI (*graphical user interface*) sehingga pengguna dengan mudah mendapat gambaran arti dari *membership function* tersebut.

Membership functions dari parameter-parameter disesuaikan dengan nilai yang mungkin muncul dari sistem kontrol. Parameter input *throttle* memiliki range nilai antara 0% - 100%. Nilai range tersebut kemudian diinterpretasikan pada *membership functions* menjadi 3 kelompok nilai yaitu *low*, *medium*, dan *high*. *Throttle low* merupakan nilai *throttle* antara 0% - 35%, *throttle medium* berkisar dari 20% - 80%, dan *throttle high* memiliki range 65% - 100%. Bentuk dari *membership functions* untuk *throttle* dapat dilihat pada Gambar 27.

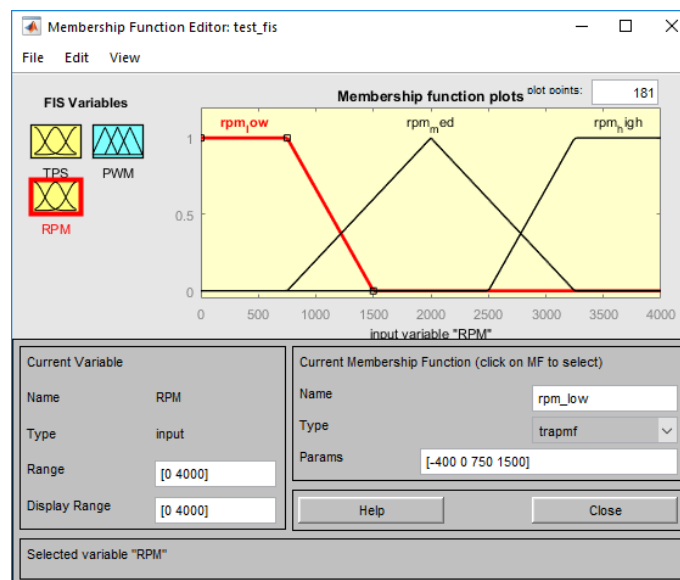


Gambar 27. Throttle Membership Functions



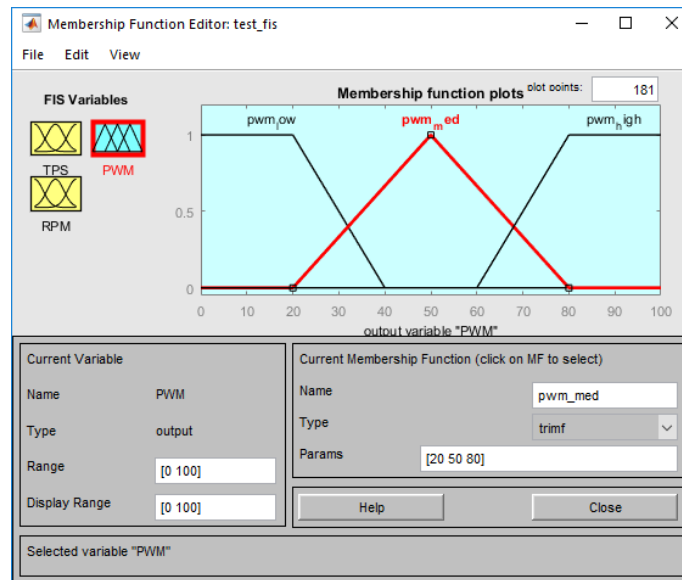
Kemudian untuk parameter input RPM yang memiliki range nilai antara 0 – 4000 rpm, didapatkan *membership functions* seperti pada Gambar 28, dengan *rpm low* memiliki range nilai antara 0 – 1500 rpm, *rpm medium* berkisar 750 – 3250 rpm, dan *rpm high* antara 2500 – 4000 rpm.

Selanjutnya untuk parameter output PWM dengan nilai range antara 0% - 100%, *membership functions* dari output PWM juga dibagi menjadi 3 kelompok yaitu *pwm low* antara 0% - 40%, *pwm medium* 20% - 80%, dan *pwm high* 60% - 100% seperti pada Gambar 29.

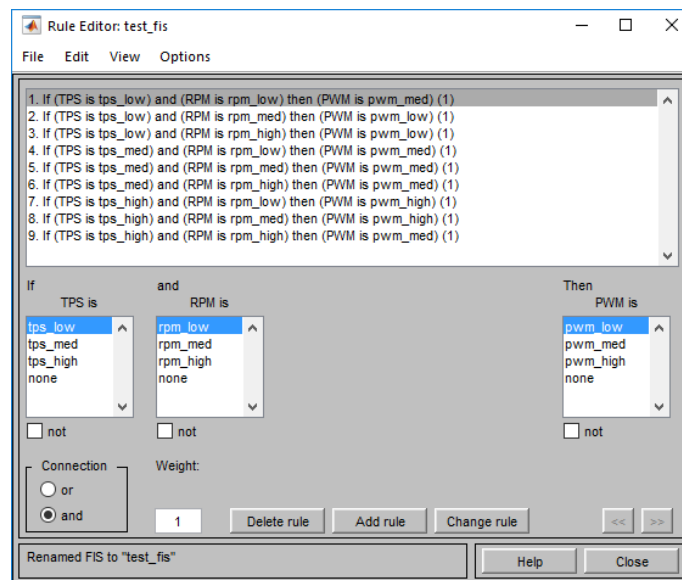


Gambar 28. Membership functions RPM

Dalam FIS, kemudian dibuat suatu aturan hubungan antara masing-masing *membership functions* dari parameter input dan parameter output. Sehingga Fuzzy Logic nantinya akan melakukan proses perhitungan berdasarkan dari aturan hubungan yang telah didefinisikan. Output dari proses perhitungan tersebut adalah response surface yang menggambarkan nilai output dari seluruh peluang kombinasi input yang terjadi. Aturan hubungan antara kombinasi input dan output dapat dilihat pada Gambar 30.



Gambar 29. Membership functions PWM



Gambar 30. Fuzzy Rule

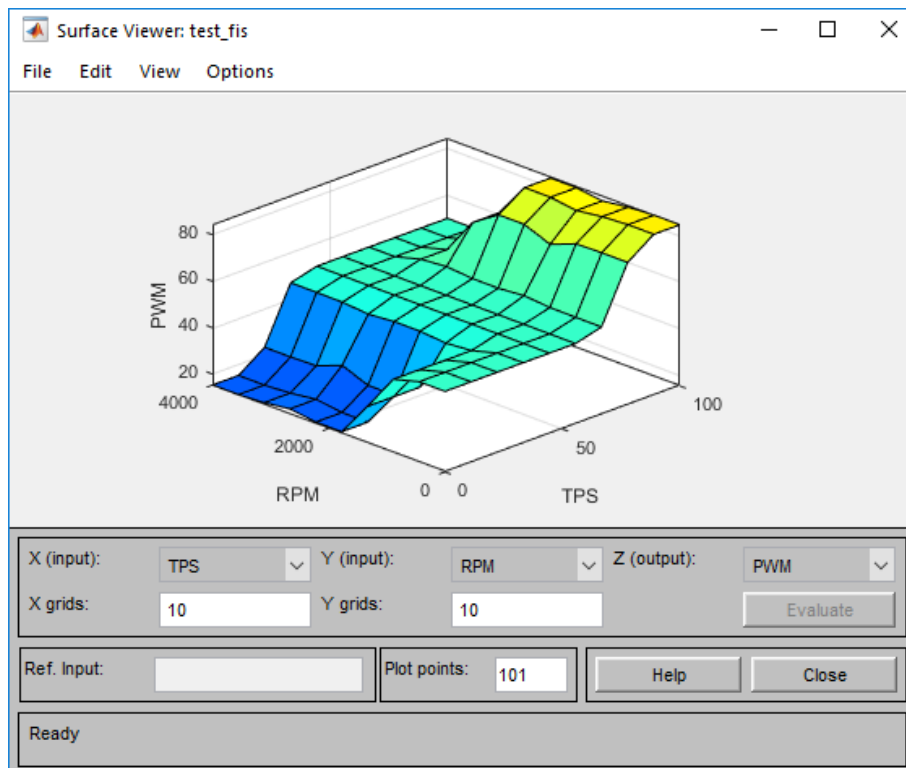
Berdasarkan *membership functions* yang telah didefinisikan sebelumnya kemudian dibuat aturan hubungan input dan output sebagai berikut.

- Jika *throttle low* dan *rpm low* maka *pwm medium*
- Jika *throttle low* dan *rpm medium* maka *pwm low*
- Jika *throttle low* dan *rpm high* maka *pwm high*
- Jika *throttle medium* dan *rpm low* maka *pwm medium*



- Jika *throttle medium* dan *rpm medium* maka *pwm medium*
- Jika *throttle medium* dan *rpm high* maka *pwm medium*
- Jika *throttle high* dan *rpm low* maka *pwm high*
- Jika *throttle high* dan *rpm medium* maka *pwm high*
- Jika *throttle high* dan *rpm high* maka *pwm medium*

Setelah dilakukan simulasi dengan dasar aturan di atas maka akan didapatkan response surface seperti pada Gambar 31. Selanjutnya response surface tersebut dapat dikonversi menjadi sebuah tabel yang berisi nilai numerik dari response surface tersebut. Proses konversi dari response surface menjadi dapat dilakukan dengan bantuan *command* pada software Matlab. Contoh tabel hasil konversi dari response surface dapat dilihat pada. Tabel tersebut nantinya akan digunakan sebagai salah inputan dalam algoritma lookup table yang telah dibahas sebelumnya.



Gambar 31. Response Surface



Tabel 5. Contoh Tabel Hasil Konversi Response Surface

Throttle	RPM	PWM
0	0	50
0	444.4444	50
0	888.8889	46.9095
0	1333.333	31.04907
0	1777.778	15.98492
0	2222.222	15.98492
0	2666.667	17.51246
0	3111.111	16.01518
0	3555.556	15.29508
0	4000	15.29508
11.11111	0	50
11.11111	444.4444	50
11.11111	888.8889	46.9095
11.11111	1333.333	31.04907

4.5. Integrasi Algoritma Lookup Table dan Fuzzy Logic

Proses integrasi algoritma lookup table dan fuzzy logic merupakan proses simplifikasi dan otomatisasi dari keseluruhan proses agar output dari response surface dalam bentuk tabel dapat dikirim ke dalam *firmware* sistem kontrol sehingga *user* tidak perlu melakukan modifikasi *firmware* setiap didapatkan output baru dari simulasi Fuzzy Logic.

Integrasi tersebut dalam penelitian dan pengembangan pada tesis ini telah memasuki tahap awal sehingga *software* telah dapat membaca tabel output dengan tampilan interface seperti pada Gambar 32. Tahapan selanjutnya adalah mengirimkan tabel tersebut ke dalam *firmware* untuk disimpan dan digunakan dalam proses kalkulasi. Akan proses pengiriman tabel menuju ke *firmware* masih terkendala dengan protokol komunikasi sehingga proses penginputan tabel saat ini masih dilakukan secara manual dengan cara menuliskan tabel secara langsung ke dalam *firmware*.



	TPS	RPM	PWM
1	0	0	11.7
2	0	285.71	12.063
3	0	571.43	12.885
4	0	857.14	14.008
5	0	1142.9	14.008
6	0	1428.6	12.885
7	0	1714.3	12.063
8	0	2000	11.7
9	0	2285.7	12.063
10	0	2571.4	23
11	0	2857.1	33.539
12	0	3142.9	39.708
12	0	2428.6	12.514

Load Fuzzy Table

Compute

TPS

RPM

Gambar 32. Tampilan Software Pembaca Tabel Fuzzy

4.6. Hasil Pengujian Algoritma Fuzzy Logic dan Lookup Table

Setelah tabel output dari response surface dituliskan didalam *firmware* maka algoritma lookup table akan dapat melakukan proses kalkulasi untuk setiap hasil pembacaan nilai *throttle* dan rpm yang muncul. Dalam rangka proses penelitian dan pengembangan tentunya diperlukan adanya suatu kegiatan validasi untuk membuktikan bahwa sistem yang telah dibuat dapat bekerja sesuai desain. Penelitian dan pengembangan sistem kontrol modular dengan menggunakan Fuzzy Logic inipun juga diakhiri dengan proses pengujian sebagai sarana validasi hasil. Pengujian dilakukan dengan cara mengaplikasikan sistem kontrol yang telah dilengkapi dengan Fuzzy Logic dalam bentuk tabel serta algoritma lookup table terhadap motor listrik. Pengujian dilakukan terhadap motor listrik ACG terlebih dahulu untuk mengetahui karakteristik dan hasilnya seperti pada Gambar 33. Pengujian juga dilakukan untuk mengetahui perbedaan antara sistem kontrol yang dilengkapi Fuzzy Logic dengan sistem kontrol dengan algoritma konvensional.

Teknis pengujian dan validasi pada tahap ini dilakukan dengan mengoperasikan sistem kontrol untuk memutar motor listrik ACG dan merekam



Gambar 33. Proses Pengujian Sistem Kontrol Modular

output PWM (*dutycycle*) yang dihasilkan pada nilai *throttle* dan rpm tertentu. Selanjutnya nilai tersebut akan divalidasi dengan menggunakan *software* pembaca tabel Fuzzy yang telah dibahas pada sub bab sebelumnya, untuk mengetahui apakah nilai output yang diberikan telah sesuai.

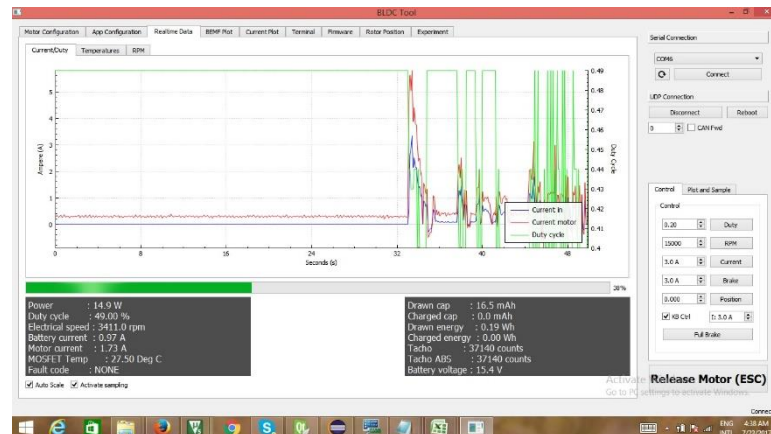
Pengambilan sample dilakukan sebanyak 3 kali untuk sistem kontrol dengan Fuzzy dan sebanyak 3 kali pula untuk sistem kontrol dengan algoritma konvensional. Adapun hasil dari pengujian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut.

4.6.1. Hasil Pengujian Sistem Kontrol dengan Fuzzy Logic

- **Sample 1**

Sample 1 dari pengujian sistem kontrol dengan Fuzzy Logic menunjukkan hasil pembacaan nilai *throttle* adalah 38% dan pembacaan rpm adalah 3411.0 rpm. Dari hasil pembacaan tersebut sistem kontrol menghasilkan nilai output PWM (*dutycycle*) sebesar 49% seperti pada Gambar 34.

Dari hasil pengujian tersebut kemudian dilakukan validasi menggunakan *software* pembaca Fuzzy Table dan didapatkan hasil bahwa nilai output PWM yang dihasilkan tepat sesuai dengan nilai pada Fuzzy Table seperti pada Gambar 35.



Gambar 34. Sample 1 Pengujian Sistem Kontrol dengan Fuzzy

The screenshot shows the MainWindow software interface. It displays a table with columns for TPS, RPM, and PWM. The table contains data for various samples, with the current sample (Sample 1) highlighted in green. The table shows that the PWM value is 43.514 for the current sample. Below the table, there are input fields for TPS and RPM, and a 'Compute' button.

	TPS	RPM	PWM
82	35.714	1714.3	43.514
83	35.714	2000	43.514
84	35.714	2285.7	43.514
85	35.714	2571.4	43.514
86	35.714	2857.1	39.708
87	35.714	3142.9	33.539
88	35.714	3428.6	49
89	35.714	3714.3	23
90	35.714	4000	23

Pos 1 = 75 , Pos 2 = 89 , Pos 3 = 87

Load Fuzzy Table

Compute

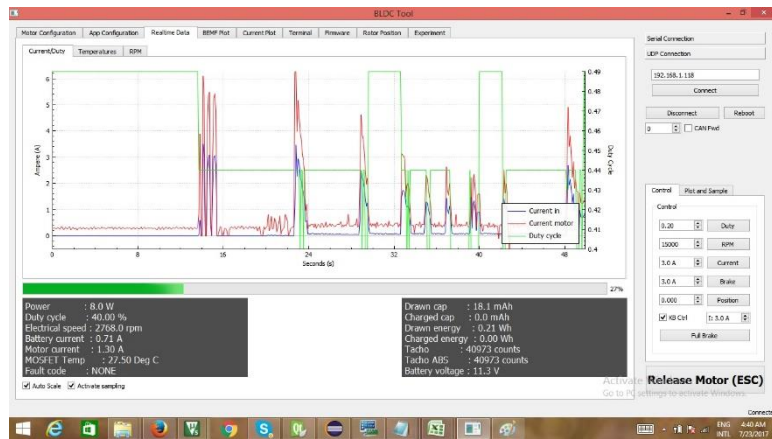
TPS: 38.0000

RPM: 3411.0000

Gambar 35. Validasi Sample 1 Pengujian Sistem Kontrol dengan Fuzzy

Sample 2

Sample 2 menunjukkan nilai *throttle* 27%, rpm 2768, dengan nilai output PWM sebesar 40%, Gambar 36. Dan setelah dilakukan validasi diketahui bahwa nilai output PWM yang seharusnya dihasilkan adalah 39.70% seperti pada Gambar 37.



Gambar 36. Sample 2 Pengujian Sistem Kontrol dengan Fuzzy

The screenshot shows the MainWindow software interface. It displays a table of test results with columns for TPS, RPM, and PWM. The table contains 10 rows of data. Below the table, there are input fields for Pos 1, Pos 2, and Pos 3, and buttons for 'Load Fuzzy Table' and 'Compute'.

	TPS	RPM	PWM
67	28.571	1714.3	39.708
68	28.571	2000	39.708
69	28.571	2285.7	39.708
70	28.571	2571.4	39.708
71	28.571	2857.1	39.708
72	28.571	3142.9	33.539
73	28.571	3428.6	33.539
74	28.571	3714.3	33.539

Pos 1 = 60 , Pos 2 = 74 , Pos 3 = 70

Load Fuzzy Table

Compute

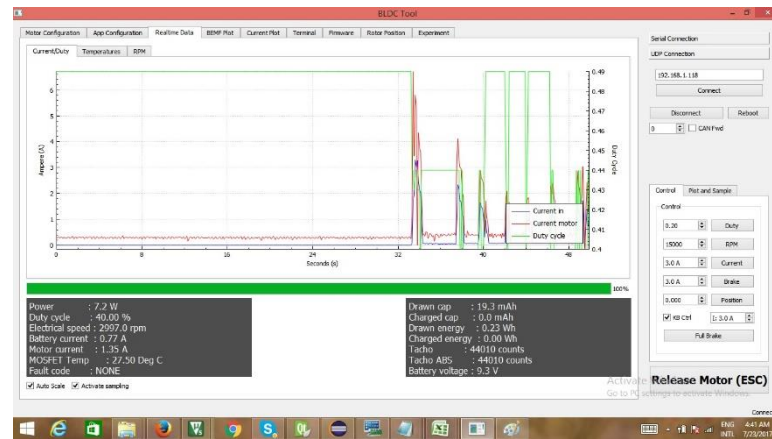
TPS: 27.0000

RPM: 2768.0000

Gambar 37. Validasi Sample 2 Pengujian Sistem Kontrol dengan Fuzzy

Sample 3

Sample 3 dari hasil pengujian menunjukkan nilai *throttle* 100%, rpm 2997, dengan nilai output PWM 40%, Gambar 38. Sedangkan validasi menunjukkan bahwa nilai output PWM yang seharusnya adalah 43% atau terpaut 3%, Gambar 39.



Gambar 38. Sample 3 Pengujian Sistem Kontrol dengan Fuzzy

The screenshot shows the MainWindow software interface. It displays a table with test results for TPS, RPM, and PWM. The table has 10 rows of data. Below the table, there are fields for Pos 1, Pos 2, and Pos 3, and buttons for Load Fuzzy Table and Compute. The Compute button is highlighted.

	TPS	RPM	PWM
92	42.857	285.71	45
93	42.857	571.43	45
94	42.857	857.14	45
95	42.857	1142.9	45
96	42.857	1428.6	45
97	42.857	1714.3	45
98	42.857	2000	45
99	42.857	2285.7	45
100	42.857	2571.4	43.514

Pos 1 = 90, Pos 2 = 99, Pos 3 = 99

Load Fuzzy Table

Compute

TPS: 100.0000

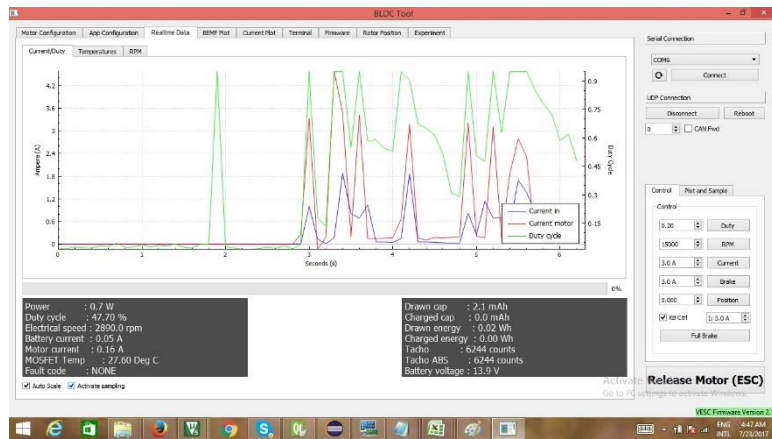
RPM: 2997.0000

Gambar 39. Validasi Sample 3 Pengujian Sistem Kontrol dengan Fuzzy

4.6.2. Hasil Pengujian Sistem Kontrol tanpa Fuzzy Logic

▪ Sample 1

Sample 1 untuk pengujian sistem kontrol tanpa Fuzzy Logic menunjukkan nilai *throttle* 0%, rpm 2890, dengan nilai output PWM 47.7%, Gambar 40. Sedangkan hasil validasinya adalah nilai output PWM sebesar 33.539%, Gambar 41.



Gambar 40. Sample 1 Pengujian Sistem Kontrol tanpa Fuzzy

The screenshot shows the MainWindow software interface. It displays a table with three columns: TPS, RPM, and PWM. The table contains 16 rows of data. Below the table, there are fields for 'Pos 1 = 0, Pos 2 = 14, Pos 3 = 10', a 'Load Fuzzy Table' button, a 'Compute' button, and input fields for TPS and RPM values.

	TPS	RPM	PWM
0	1714.3	12.063	
8	2000	11.7	
9	2285.7	12.063	
10	2571.4	23	
11	2857.1	33.539	
12	3142.9	39.708	
13	3428.6	43.514	
14	3714.3	45	
15	4000	45	

Pos 1 = 0, Pos 2 = 14, Pos 3 = 10

Load Fuzzy Table

Compute

TPS: 0.0000

RPM: 2890.0000

Gambar 41. Validasi Sample 1 Pengujian Sistem Kontrol tanpa Fuzzy

Sample 2

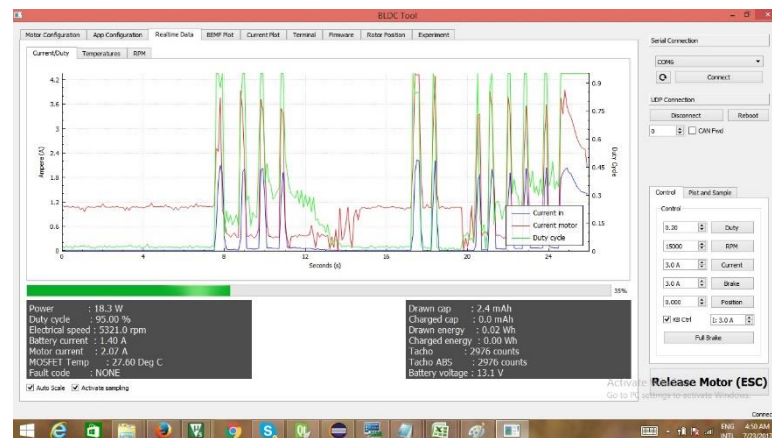
Sample 2 hasil pengujian sistem kontrol tanpa Fuzzy menunjukkan nilai *throttle* 35%, rpm 5321, dengan nilai output PWM sebesar 95%, Gambar 42. Sedangkan hasil validasi menunjukkan nilai output PWM seharusnya 23%, Gambar 43.

Sample 3

Sample 3 hasil pengujian sistem kontrol tanpa Fuzzy menunjukkan nilai *throttle* 12%, rpm 972, dengan output PWM 10.1%, Gambar 44.



Sedangkan nilai output seharusnya dari hasil validasi adalah 25.492%,
Gambar 45.



Gambar 42. Sample 2 Pengujian Sistem Kontrol tanpa Fuzzy

MainWindow			
	TPS	RPM	PWM
81	35.714	1428.6	43.514
82	35.714	1714.3	43.514
83	35.714	2000	43.514
84	35.714	2285.7	43.514
85	35.714	2571.4	43.514
86	35.714	2857.1	39.708
87	35.714	3142.9	33.539
88	35.714	3428.6	23
89	35.714	3714.3	23
90	35.714	4000	23

Pos 1 = 75 , Pos 2 = 89 , Pos 3 = 89

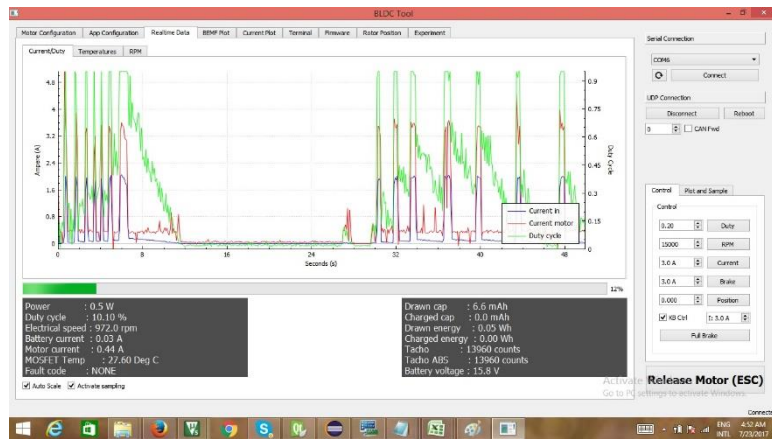
Load Fuzzy Table

Compute

TPS

RPM

Gambar 43. Validasi Sample 2 Pengujian Sistem Kontrol tanpa Fuzzy



Gambar 44. Sample 3 Pengujian Sistem Kontrol tanpa Fuzzy

The screenshot shows the MainWindow software interface. It features a table with three columns: TPS, RPM, and PWM. The table contains 10 rows of data, with the first 9 rows having a TPS value of 14.286 and the 10th row having a TPS value of 14.286. The RPM values range from 0 to 2571.4, and the PWM values range from 23 to 25.492. Below the table, there are buttons for 'Load Fuzzy Table' and 'Compute', and input fields for TPS and RPM values.

	TPS	RPM	PWM
31	14.286	0	23
32	14.286	285.71	23
33	14.286	571.43	23
34	14.286	857.14	25.492
35	14.286	1142.9	25.492
36	14.286	1428.6	23
37	14.286	1714.3	23
38	14.286	2000	23
39	14.286	2285.7	23
40	14.286	2571.4	23

Pos 1 = 30 , Pos 2 = 44 , Pos 3 = 33

Load Fuzzy Table

Compute

TPS : 12.0000

RPM : 972.0000

Gambar 45. Validasi Sample 3 Pengujian Sistem Kontrol tanpa Fuzzy

4.6.3. Pembahasan Hasil Pengujian

Berdasarkan dari sample-sample hasil pengujian untuk sistem kontrol dengan Fuzzy menunjukkan bahwa hasil output nilai PWM yang dihasilkan sama ataupun hampir mendekati nilai output seharusnya. Adanya error atau selisih antara hasil pengujian dengan nilai pada proses validasi dapat dikarenakan adanya delay dalam penampilan data. Namun meskipun begitu error yang terjadi pun dapat ditoleransi dikarenakan tidak melebihi 10%.



Sedangkan untuk sample-sample hasil pengujian dari sistem kontrol tanpa Fuzzy memiliki error yang cukup besar jika dibandingkan dengan hasil validasi. Tentunya hal ini disebabkan algoritma yang memang berbeda dalam penentuan nilai output PWM.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Penelitian dan Pengembangan Sistem Kontrol Modular dengan Fuzzy Logic untuk Motor Listrik BLDC Aksial menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Fuzzy Logic dapat diimplementasi pada sistem kontrol modular untuk motor listrik BLDC aksial dengan menggunakan hubungan input – output antara parameter-parameter *throttle*, *rpm*, dan *pwm*.
2. Desain dari sistem kontrol modular untuk motor listrik BLDC aksial dengan Fuzzy Logic pada tesis ini menggunakan output table dari response surface yang diproses dengan menggunakan algoritma lookup table.
3. Proses pengaturan parameter pada sistem kontrol menjadi lebih mudah dengan hanya menentukan *membership functions* dari 3 parameters serta hubungan antar ketiganya.
4. Hasil implementasi dari Fuzzy Logic menunjukkan bahwa nilai output yang dihasilkan sesuai dengan profil dari Fuzzy Response Surface digambarkan dengan besarnya error yang terjadi yaitu error = 0% untuk sample 1 (*pwm* = 49%, *throttle* 38%, *rpm* 34110), error = 0.3% (*pwm* 40%, *throttle* 27%, *rpm* 2768), serta error = 3% (*pwm* 40%, *throttle* 100%, *rpm* 2997) apabila dibandingkan dengan sistem kontrol yang tidak dilengkapi dengan Fuzzy Logic dimana error yang dihasilkan cukup besar yaitu error = 14.161% (*pwm* 47.7%, *throttle* 0%, *rpm* 2890), error = 72% (*pwm* 95%, *throttle* 35%, *rpm* 5321), dan error = 15.392% (*pwm* 10.1%, *throttle* 12%, *rpm* 972). Dari hasil tersebut dapat dikatakan bahwa sistem kontrol dengan menggunakan algoritma fuzzy logic dapat memberikan output performa yang lebih baik karena nilai error yang terjadi lebih kecil.



5.2. Saran

Sehubungan dengan penelitian dan pengembangan sistem kontrol modular untuk motor listrik BLDC aksial dengan Fuzzy Logic pada tesis ini, penulis ingin menyampaikan saran sebagai berikut:

1. Mengingat masih banyaknya proses pengujian dan validasi yang belum dilakukan, penulis menyarankan agar kedepan dapat dilakukan proses pengujian dan validasi untuk mengetahui performa aktual dari sistem kontrol dengan Fuzzy Logic.
2. Penulis juga menyarankan untuk mengembangkan metode lain dalam mengimplementasikan Fuzzy Logic pada sistem kontrol.

5.3. Penelitian Selanjutnya

Terkait pengembangan sistem kontrol modular untuk motor listrik BLDC aksial dengan *Fuzzy Logic* perlu dilakukan penelitian lanjutan berikut:

1. Proses *tuning* sistem kontrol modular untuk mendapat konfigurasi berupa *Fuzzy Response Surface* yang tepat.
2. Pengujian sistem kontrol modular dengan menggunakan *Chassis Dynamometer*
3. Pengembangan sistem kontrol modular dengan implementasi *Fuzzy Logic* tertanam pada *firmware*.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Albert Rajan dan Dr. S. Vasantharathna. (2010), “Fuzzy Logic Based Reconfigurable Optimal Switching Controller for BLDC Motor for Reduced Harmonics”, IPEC 2010.
- [2] Agus Mukhlisin. (2014), “Perancangan Modular Controller 3 Phase Brushless Direct Current (BLDC) Motor Menggunakan ARM 32-Bit Cortex M-4 MCU, Tugas Akhir Sarjana, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- [3] D. C. Hanselman. (1994), “Brushless Permanent-Magnet Motor Design”, New York: McGraw-Hill
- [4] Goqiang Cheng. (2012), “Brushless DC Motor Speed Control System Based on Fuzzy PID Controller”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012
- [5] Jawa Pos – Radar Bali. (2016), “Ini Harga Motor Listrik GESITS 100 Persen Karya Anak Bangsa”, <http://radarbali.jawapos.com/read/2016/11/13/8226/ini-harga-motor-listrik-gesits-100-persen-karya-anak-bangsa/2>
- [6] Nur Yuniarto. (2016), “Laporan Akhir Pengujian Performa Sepeda Motor Listrik GESITS Sesuai Standar Internasional ISO 13064-2”,
- [7] R. Arulmozhiyal dan R. Kandiban. (2012), “Design of Fuzzy PID Controller for Brushless DC Motor”, ICCCI 2012



Halaman ini sengaja dikosongkan



BIOGRAFI PENULIS



Penulis dilahirkan di Malang, 19 Maret 1991 dan terlahir sebagai anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal sejak di SDN 1 Sumorame, SMPN 1 Candi, SMAN 1 Sidoarjo, dan dilanjutkan dengan menempuh pendidikan S1 di Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama menempuh pendidikan di jenjang S1, penulis cukup aktif mengikuti kegiatan kemahasiswaan khususnya di bidang penelitian kendaraan listrik.

Dimulai dari kegiatan kompetisi mahasiswa tingkat nasional (Indonesia Energy Marathon Challenge 2012 – IEMC) hingga kompetisi mobil bertenaga matahari di tingkat Internasional (World Solar Challenge 2013) yang diselenggarakan di Australia.

Setelah lulus menempuh pendidikan S1 di Jurusan Teknik Mesin – ITS, penulis melanjutkan pendidikan di program Magister Teknik di Jurusan Teknik Mesin ITS pada tahun 2015. Pendidikan di jenjang S2 ditempuh selama 2 Tahun dengan fokus bidang keahlian Desain Sistem Mekanikal. Penulis melakukan penelitian ini dengan tujuan agar pengembangan kendaraan listrik di Indonesia semakin pesat dan tidak tertinggal dengan negara-negara lain.



Halaman ini sengaja dikosongkan